ОТ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА ДО ВЕЛИКОГО МОЛЧАНИЯ



Владимир Липунов

Великое молчание Вселенной, или отсутствие Космических Чудес, находится в очевидном противоречии с быстрым развитием нашей цивилизации. Но самое поразительное, что оба эти явления и должны рассматриваться как самое настоящее Космическое Чудо.

Крупный физик-теоретик, талантливый писатель «Физик» и «лирик» в одном лице — феномен или сон разума?

Альфред Барон

Владимир Липунов

ОТ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА ДО ВЕЛИКОГО МОЛЧАНИЯ

ОГИЗ
Издательство АСТ
Москва

УДК 524
ББК 22.632
Л61

Липунов, Владимир Михайлович.
Л61 От Большого Взрыва до Великого Молчания / В.М. Липунов; — Москва : Издательство АСТ, 2018. — 464 с. : — (*Лекторий: как устроен мир*).

ISBN 978-5-17-109903-9

«Нас не много, тех, кто однажды вышел в степь широкую и увидел на небосклоне Вселенную. Небосвод, будто старинный театральный занавес перед началом спектакля ещё не поднялся и скрывает великую тайну бытия. Мы с тревогой ждём начала этого прекрасного спектакля, яркого, блистающего наполненного фантастическими событиями. Иначе, отчего сквозь продырявленное звёздами бездонное чёрное полотно, оттуда, с той неизведанной, скрытой стороны, прорывается к нам таинственный мерцающий её отблеск»

В. Липунов

Как возникла наша Вселенная? Почему наша Вселенная горячая? Зачем нужны темная энергия и темная материя? Что такое Великое Молчание и почему нам никто не пишет из глубин Вселенной? Вот круг вопросов, по которому движется авторская мысль.

УДК 524
ББК 22.632

ISBN 978-5-17-109903-9

© Оформление.
ООО «Издательство АСТ», 2018

Предисловие

Посвящается моей жене,
которая малого того, что терпит
мой несносный характер, так ещё подгоняла
последние 3 года к написанию этой книги.
В. М. Липунов

Банальным штампом популярной литературы по астрономии стало сравнение науки о звёздах с археологией. Дескать, глядя на далёкие звёзды и тем более галактики, из-за конечности скорости света мы видим их такими, какими они были тысячи, миллионы и миллиарды лет назад. Конечно, это столь же верно, сколь и избито. Лейтмотивом настоящей книги станет совсем другая мысль, мысль о том, чему человечество может научиться у Вселенной. А именно как, изучая Вселенную, можно узнать будущее нашей Земли, нашей Солнечной системы, Галактики, самой Вселенной и, наконец, человеческой цивилизации. Ведь именно будущее человека и человечества является самой волнующей загадкой, которая мучает человека с момента осознания им своего **Мы**.

Эта книга написана астрофизиком[1]. А астрофизик — это физик с задранной кверху головой. А вверху-то мир, управляемый законами физики, причём всеми извест-

[1] Автор скромничает. Под псевдонимом Владимир Хлумов он написал несколько рассказов, повестей и романов, впрочем, малоизвестных широкой публике и узким литературным кругам.

ными и всеми неизвестными. Поэтому, рассказывая об устройстве Вселенной, мне пришлось использовать сведения из различных областей физики (практически всех): Механики, Теории относительности (специальной и общей), Квантовой механики, Термодинамики, Электродинамики, теории колебаний, Оптики и т. д. Поскольку я старался написать так, чтобы всё было понятно даже школьнику (но, конечно, старших классов), то мне пришлось попутно объяснять и многие физические законы. Делал это я только по необходимости.

Хочу отметить моих коллег, которые не только позволяли мне предаваться моим графоманским слабостям, но и помогали с иллюстративным материалами. В частности, все фотографии были приготовлены Евгением Горбовским. Но кроме того…

Помогал мне велосипедист Петя, который во всей книге путешествует из пункта *А* в пункт *Б*. Петя поссорился со своей девушкой в пункте *А* и отправился в долгое путешествие в пункт *Б*, помогая читателям разобраться с тем переворотом в понимании окружающего мира, который учёные-физики совершили за последние сто лет.

По ходу повествования мне помогал ещё один герой моей книги. Зовут его *Уффф*. Нет, он не инопланетянин. Это такое мыслимое устройство, помогающее понять сложные вещи, изложенные на простом человеческом языке. Вообще-то Уфф, такой молодящийся старикан, который постоянно ворчит и пыхтит когда работает. У него отвратительный характер, но без него никак не обойтись в популярной книге. Ведь *Уффф* — это Универсальный упроститель физических формул. Вот как упростишь что-нибудь совсем «неподъёмное», тут и радостно вздохнёшь: *Уффф!*

Глава 1
Вселенная, которой не могло быть

От печки

Итак, глядя вдаль, астрономы видят вчерашнюю Вселенную. Просто это «вчера» тем дальше во времени, чем глубже в пространство заглядывает человек. На самом деле это стало ясно ещё в 1676 году, когда датский астроном Оле Рёмер впервые установил, что скорость света не бесконечна. Он нашел её числовое значение, которое оказалось достаточно близко к современному значению — 300 000 км/с. На рисунке 1 приведена иллюстрация из статьи Рёмера 1676 г. Рёмер наблюдал моменты затмений спутника Юпитера Ио при разных положениях Земли на орбите в точках F, G, L, K. Если бы Земля стояла на месте, то затмения спутников Юпитера случались бы строго периодически (с периодом обращения спутника). Однако из-за годичного вращения Земли изменяется расстояние до Юпитера и изменяется время путешествия света по маршруту Юпитер—Земля, поэтому момент затмения спутников тоже изменится. Причём тем больше, чем меньше скорость распространения света.

Мир, который мы видим вокруг нас — это мир, которого уже нет! Правда, в обыденной жизни мы этого не замечаем. За модную ныне наносекунду свет проходит 30 см. Расстояние от Санкт-Петербурга до Москвы свет преодолевает за 2,5 мс — время, не регистрируемое человеческими органами. Например, глаз реагирует на временные интервалы более 0,1 с, за это время свет практически обогнёт всю Землю. Но, например, Луна видна такой, какой она была 1,5 с назад, солнце 8 мин, а ближайшие звёзды — несколько лет назад. Как мы видим, предельная скорость распространения сигналов в нашей Вселенной вполне себе не ахти какая с точки зрения человека. Ведь человек видит простым глазом объекты, до которых он никогда не доберётся.

Но самым удивительным открытием XX в. стало то, что вчерашняя Вселенная отличается от сегодняшней. Как мы увидим, это совершенно нетривиально и никак не связано с открытием Рёмера. Действительно, представьте себе, что мы живём в бесконечной (и в пространстве и во времени) Вселенной, не имеющей ни начала, ни конца. Глядя на далёкие объекты, мы должны были бы видеть их примерно такими же, как и в настоящее время. Однако наша Вселенная устроена не так. Сейчас мы уверены, что далёкие галактики нашей Вселенной

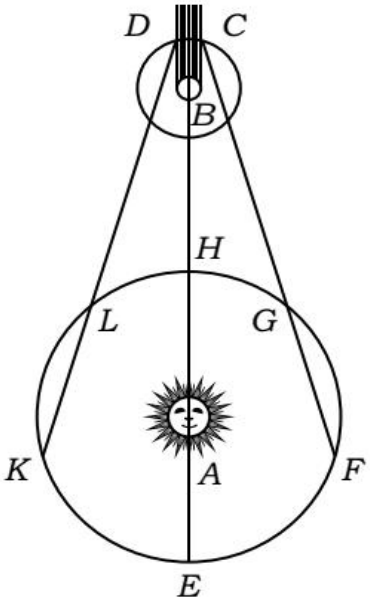


Рис. 1

действительно другие! Они моложе! На научном языке это означает, что Вселенная эволюционирует. Многие думают, что доказательством эволюции Вселенной является разбегание Галактик, которое обнаружил американский астроном Весто Мелвин Слайфер ещё до начала Первой мировой войны (1913–1914 гг.). Действительно, Слайфер обнаружил, что все далёкие галактики убегают друг от друга, и следовательно наша Вселенная становится всё больше и больше. Но это совсем не так. Представьте себе вечную Вселенную, в которой непрерывно рождаются частицы, например те, из которых построены атомы — протоны и электроны. Для простоты будем считать, что эти частицы при рождении уже объединены в атомы водорода. Пусть гравитационное поле Вселенной обладает таким чу́дным свойством, что любые атомы, постоянно появляющиеся из пустоты, тут же начинают разбегаться в разные стороны, оставляя плотность Вселенной неизменной. Вы скажете, что же это за гравитация? Да, не похоже. Скорее это напоминает антигравитацию. Но её нет, сказали бы вы, и я с вами бы согласился… лет 30 назад. Кстати, компьютерная программа Word, в которой я писал эту книгу, даже сейчас не знает слово «антигравитация»!

Что же увидят жители этой чу́дной Вселенной? Они увидят Вселенную, в которой частицы разбегаются в разные стороны с ускорением, а плотность её все время остаётся одной и той же! И как глубоко вы бы не заглядывали — Вселенная там была бы ничуть не более молодой! Такую Вселенную придумал замечательный английский астрофизик Фрэд Хойл в 1948 г. и назвал её стационарной Вселенной. Ровно через

60 лет, в 1998 г., ускоренное расширение Вселенной было открыто экспериментально (Нобелевская премия по физике за 2011 г.)!

Но наблюдения показали, что далёкие галактики оказываются более молодыми, чем нынешние, и это противоречит модели Хойла. Так что наша Вселенная действительно была когда-то моложе, а когда-то её не было вовсе.

Мир, в котором мы живём

Где мы живём? Где ты живешь, дорогой читатель? Выйдя с этим вопросом на людную улицу в каком-нибудь мегаполисе типа Москвы, Рима, Нью-Йорка или Пекина, ты услышишь тысячи разных ответов. И не потому, что у всех разные квартиры, дома и машины, а потому, что у всех разный кругозор. Да, мир одного человека заканчивается забором приусадебного участка, а другого — океанской яхтой. Но ведь не это делает разными их Вселенные. Конечно, Вселенная человека определяется его знаниями. Одна из задач этой книги — расширить ваш мир до размеров в миллиарды световых лет.

Представьте, что на улице Москвы вам случайно встретился астроном, а точнее астрофизик. Что он ответит о своем мире? Вообще-то ответ ещё будет зависеть от того, когда случилась ваша встреча. Например, в начале прошлого века, в году эдак 1905, его мир был бесконечен и во времени, и в пространстве. Через четверть века мир скукожился до одного миллиарда световых лет, а в конце XX в. раздулся в 10 раз. На самом деле, конечно, это не

Вселенная менялась, а менялись наши знания о ней. Что знает астрофизик XXI в. о мире, в котором мы живём?

Прежде всего, наука — это числа. Поэтому важнее всего для учёного описать нашу Вселенную в числах. Но чисел много и даже очень много. Попробуем выделить главные. Одно из чисел, мы уже упомянули — скорость света. Когда Рёмер впервые определил её значение, он и не подозревал, что открывает одну из важнейших физических величин нашего мира — максимальную, универсальную скорость распространения сигнала в нём. Впервые это осознал в том самом 1905 г. Альберт Эйнштейн. Тогда ещё Вселенная была бесконечна и безгранична, но в ней поселилась некая сущность, даже я бы сказал некий запрет — Вселенная попала под иго тоталитаризма, если не сказать хуже — авторитаризма. Как же так, воскликнет образованный читатель, ведь Альберт Эйнштейн в 1905 г. создал специальную теорию относительности! Теорию релятивизма! Теорию равноправия и равноценности так называемых физических наблюдателей. Он дал каждому свою систему отсчёта и сказал: вы все равны! Куда ж демократичнее?! Но, я вам скажу, что сам Эйнштейн называл свою теорию — теорией абсолюта. Ведь до него любое тело, в том числе и тело либерала, могло двигаться с любой скоростью, и никакого ему дела до скорости световых сигналов Рёмера не было! Даже в теории электромагнитного поля Максвелла уже содержалась идея постоянства скорости света. Но только скорости света! Скорости распространения колебаний электромагнитного поля.

Что же нового сказал Эйнштейн в своей знаменитой статье «К электродинамике движущихся тел» 1905 г. Здесь впервые проявилось замечательное качество Эйнштейна — увидёть в известном нечто большее, а иногда и просто великое. Он предположил, что пространство и время связаны неким абсолютом.

Так вот Эйнштейн постулировал, что скорость света не только не зависит от системы отсчёта, но и является максимально возможной скоростью передачи любого материального объекта в нашем Мире. А свет — это только один из возможных переносчиков материальной энергии. Причём же здесь пространство и время, или как мы после 1905 г. пишем через дефис: пространство-время? Так ведь скорость — это пройденный светом в пространстве путь, делённый на затраченное время. Если их отношение неизменно, то получается, что числитель и знаменатель этой дроби связаны друг с другом намертво. Я написал, что Эйнштейн «постулировал» постоянство скорости света. Некоторые из нас ещё из школьной программы помнят, что в математике есть понятие постулата — недоказуемого, неоспоримого, фактически принятого «на веру» утверждения. Например, в геометрии Эвклида в качестве постулата выдвигается пятый постулат о параллельных прямых: через точку вне данной прямой проходит одна и только одна прямая, не пересекающаяся с данной. («*Да, удачный пример. Ничего не скажешь — взять постулат, который Лобачевский опроверг!*» — *Уфф*[2]). Оказывается, это-

[2] Здесь впервые появляется Уфф. Читатель поначалу может не обращать на него внимания. Но я не могу его изгнать из повествования. Ведь это он сам внезапно появляется со своими едкими замечаниями, как чёрт и табакерки.

го постулата достаточно, чтобы доказать утверждение, что сумма углов треугольника равна 180 градусов. Это утверждение, уже будет называться теоремой. Теорема вещь хорошая, она понятна, её можно объяснить. Постулат объяснить нельзя. Но неожиданным является тот факт, что постулат и теорема могут меняться местами! Например, для построения геометрии Эвклида можно положить в качестве постулата утверждение о равенстве сумм углов любых треугольников. А уже из него доказать теорему о параллельных прямых и все другие теоремы.

Физика похожа на математику, поскольку физики пишут математические формулы. Здесь тоже можно менять местами некоторые постулаты и теоремы. Например, в специальной теории относительности можно постулировать постоянство скорости света, а можно постулировать совсем другое утверждение, которое, по моему мнению, более понятно. Хотя сам Эйнштейн, рассказывая о том, как он пришёл к идее постоянства скорости света, приводил следующий мысленный эксперимент. Представьте себе, что вы погнались за светом и догоняете его, как обычного велосипедиста. Но ведь свет — это колебания электромагнитного поля. Однако если вы догнали фотон, то никаких колебаний не будет и фотон пропадёт! Значит, свет догнать нельзя, подумал Эйнштейн, а мы можем только удивиться, откуда он мог знать в 1905 г. о том, что рождение и исчезновение элементарных частиц не зависит он того двигается наблюдатель или покоится!

До Эйнштейна всякие физические явления разыгрывались в трёхмерном пространстве. Например, из пункта *А* в пункт *Б* выехал велосипедист Петя. Пусть

ради объективности, в пункте *А* осталась Маша, потому что Петя и Маша поссорились. Пусть Петя едет, а мы пока посмотрим с Машей на эти пункты внимательнее. В классической физике считалось, что расстояние между ними (отрезок *АБ*) не зависит от того, едет Петя на велосипеде или стоит рядом, например, подкачивая сдутую шину. Другое дело в теории относительности. Там нет никаких пунктов *А* и *Б*, пусть хоть они — Москва и Петербург. Вернее пункты все-таки есть, но есть они не в пространстве, а в пространстве-времени. Добавим к трем осям: высота, длина, ширина, четвертую — время! Для нашего мысленного эксперимента удобно одну из осей пустить вдоль дороги, которая пусть будет совершенно прямая, ведь это мысленная дорога. Все, кто хранит зимой велосипеды, подвешивая их на стены, знают, двухколесный велосипед — вещь плоская, да и Петя не толстяк, поэтому от ширины и высоты можно избавиться. Так у нас останется только два измерения — длина пути и время в дороге. Время — часть геометрии пространства-времени. Но время не совсем пространство — оно в чем-то другое, его не отгородишь забором, и не обойдёшь на яхте. Чтобы сделать время похожим на пространство, давайте умножим время t на скорость света — длина ct, которую можно измерять в сантиметрах, метрах, а ещё удобно использовать астрономические единицы — световое расстояние. Например, время 1 год, соответствует длине 1 световой год (примерно 10^{18} см), 1 ч — один световой час, 1 с — одна световая секунда и т. д. Теперь можно складывать сантиметры и секунды, предварительно умножив последние на скорость света. А вот и нельзя! Ведь

что такое пространство? В пространство можно ступить ногой, можно в нем побегать туда-сюда, можно там потерять кошелек или кредитную карточку, потом вернуться и поискать *(«Под фонарём» — Уффф)*, в общем, пространство вещь полезная и удобная. Но вот время совсем другое и в него так просто не вернёшься.

Время — мнимое пространство?

Во-первых, времени всегда не хватает. Во-вторых, время — это мнимое пространство. А что значит слово мнимое? Слово «мнимое» дословно означает мыслимое, придуманное, воображаемое. Согласитесь, звучит довольно размыто. Ведь мы говорим о физическом времени, о времени, которое можно измерить. И здесь на помощь приходит язык математики. Да, да, именно язык. Ведь математические формулы, это суть некие высказывания, т. е. просто предложения, записанные к тому же с помощью своеобразных иероглифов — математических символов. Но в отличие от обычных высказываний, математические высказывания всегда подчинены строгой, её называют формальной, логике. Конечно, и математическое высказывание может быть верным или ошибочным. Иногда математики говорят истинными или не истинными высказываниями. Вы скажете, что и наши разговорные высказывания то же бывают правдивыми и ложными. Да, но отличие наших высказываний от математических состоит в том, что установить правдивость обычных высказываний практически невозможно или очень трудно. Вспомните, напри-

мер, судебные процессы. А ведь в них используется наиболее строгий вариант логики обыденного языка, опирающегося на строгие, правда придуманные человеком, законы. А, тем не менее, мы часто видим, как осуждают невиновного и наоборот оправдывают преступника. В математике установление истины гораздо более строгое дело. Правда, истина эта будет математическая. Физика дает много послаблений, физика, например, не рассматривает математические модели, противоречащие устройству нашего мира. Учёному-физику важно понять физический смысл происходящего. А математика для физика — это часто костыли, которые помогают ходить в дебрях нового и неизвестного. Костыли, конечно, звучит немного грубо, но в сущности это часто так. Конечно, есть разные учёные-физики. Я встречал учёных с абсолютно гениальной интуицией, которые могли, не решая математических уравнений, предсказать ответ сложной задачи просто пользуясь своим ясным пониманием физических процессов. Один из ярчайших физиков такого склада ума в XX в. был мой учитель академик Яков Борисович Зельдович — физик-универсал — один из создателей атомного оружия в СССР и целого научного направления релятивистской астрофизики. Встречал и других людей, так называемого математического склада ума, которые умели великолепно решать математические уравнения, но никогда не могли на пальцах объяснить получаемый ответ. Помню, как на докладе в Москве выступал нобелевский лауреат — американский астрофизик индийского происхождения — Субраманьян Чандрасекар. Дело происходило на семинаре

Зельдовича[3]. Чандрасекар рассказывал об одной работе по математической теории чёрных дыр. Речь шла, кажется, о гравитационно-волновом излучении вращающейся несимметричной чёрной дырой. Доклад Чандрасекара выглядел очень сухо, как это обычно бывает на семинаре по математической теории гравитации. Надо было видеть ЯБ[4] (он в свое время решал подобную задачу, но для электромагнитных волн), который на правах ведущего пытался все время вставить свое понимание происходящего, но долго терпел — поскольку время у докладчика отбирал ещё перевод с английского. И наконец, после аплодисментов, ЯБ выскочил к доске (знаменитая вращающаяся доска ГАИШ из натуральной черной кожи, с двумя предательскими ручками — одна чтобы вращать доску, другая — чтобы опускать белый экран для показа слайдов[5]). Так вот ЯБ лихорадочно путая штурвалы, нашел место какое-то на доске и очень быстро написал пару

---

[3] Знаменитый ОАС — Объединенный астрофизический семинар. Одно время мне — тогда аспиранту — посчастливилось быть его секретарем. Это была небезопасная должность. Каждые две недели мне приходилось рассылать более сотни конвертов по всем московским институтам, имеющим отношение к релятивистской астрофизике и космологии. Конверты заклеивались канцелярским клеем, который приходилось смачивать языком. После сотни заклеенных конвертов можно было не думать о завтраке.

[4] ЯБ — так за глаза звали Зельдовича его ученики.

[5] Предательская конструкция этой доски постоянно ставила в тупик докладчиков, которые то и дело путали ручки и вместо того, чтобы вернуть какую-то важную формулу, сверху на докладчика съезжал (иногда под смех зала) белый матерчатый экран, закрывая доску с формулами. Среди таких мучеников попадались и нобелевские лауреаты как Андрей Дмитриевич Сахаров и Виталий Лазаревич Гинзбург и другие, всемирно известные учёные.

простых алгебраических равенств и объяснил, что же на самом деле доказал Чандрасекар. Зал ахнул. А Нобелевский лауреат, который очевидно ничего не понял, математически посмотрел на ЯБ и процедил что-то вроде — моё дело решать уравнения.

Но чудо математики состоит не только в том, что она как некий бумажный компьютер за нас думает и за нас решает сложные уравнения. А ещё, оказывается, математика рождает такие сущности, о которых физики поначалу ничего не знают, а потом иногда через столетия открывают их в окружающем мире. Более того существует такое крайнее мнение, что всё придуманное математиками рано или поздно найдётся во Вселенной!

Одной из таких сущностей были математические мнимые числа, придуманные за 300 лет до того как они появились в физике. Все началось с натуральных, т. е. целых положительных чисел, которыми обычные люди считали своё племя, своё стадо, своих рабов, своих клиентов и т. д. Почти сразу появились отрицательные числа — это когда приходили захватчики — грабили и уводили в рабство не только рабов, но и хозяев, и те становились рабами. Когда появилось сельское хозяйство в виде возделывания полей и торговля мелкими несчётными плодами — зернами, возникли дробные числа. Среди них оказались неделимые, т. е. иррациональные (это почти мнимые), но ещё вполне ощущаемые. Например, попробуйте поделить мешок пшеницы на три части — будет ноль и три в периоде. Потом все затихло на тысячелетия, и вдруг появилась мнимая единица. «Отчего, — сказал неизвестный математик, — квадрат числа всегда положительный?» Квадрат тоже число. Оно может

быть и натуральным, например, 4 — это 2 в квадрате. Может быть дробным — например, одна десятая в квадрате — это одна сотая. И даже иррациональной. Например, корень квадратный из 2. Но почему не отрицательным числом? Хм... как же, ведь квадрат числа нужен когда? Когда человек пытается посчитать площадь своего приусадебного участка. Но площадь — величина сугубо положительная! А вот и нет. Представьте себе, что некий эсквайр[6] решил вести реестр своего квадратного поля, которое многие века его предки передавали из поколения в поколение. В ходе этой истории, иногда его предки приезали земли, а иногда более удачливые соседи отрезали у них. В своем историческом гроссбухе можно было писать подробно: такую-то земельку отпилил сэр такой-то, а вот этот пригорок добыл прадед. Но для сухого остатка, он напишет землю прирезанную — с плюсом, а землю потерянную — с минусом. Вот вам и отрицательная площадь. Просто, обычный эсквайр на этом бы и остановился, а вот вдумчивый однажды спросил себя, а чему равна сторона квадрата, площадь которого равна –1 сотке? Ну, естественно, где ж взять такое землемерное устройство? Да не надо его брать. Надо просто быть проще. Придумаем иероглиф для этой стороны «i» и назовём его мнимой единицей. У нее только одно свойство — она есть сторона того отрезанного квадрата площадь которого равна –1 (*Уффф!*).

Мнимые величины появились впервые в книге «Великое искусство, или об алгебраических правилах» итальянского математика Кардано в 1545 г.

[6] Эсквайр — мелкий земельный собственник.

Однако сам Кардано не очень верил в их полезность. Как утверждают злые языки, Кардано украл эту замечательную идею у своего соотечественника, а когда тот пришел к его дому и начал кричать: «Вор! Вор!», Кардано вышел из дому и побил того палкой. Впервые мнимые числа оценил Леонард Эйлер в 1777 г. в Санкт-Петербурге! *(См. Вклейку 1)* Да, да именно в столице русской империи, где он прожил и проработал больше половины своей жизни, появилась одна из трёх величайших формул открытых человечеством, которые содержат не более 6 символов:

$$e^{i\pi} = -1.$$

Здесь связаны четыре самых важных числа в математике: $e = 2{,}71828\ldots$, $i = \sqrt{-1}$ — мнимая единица, $\pi = 3{,}14$. Число e является пределом $(1 + 1/n)^n$ при n, стремящемся к бесконечности.

По-моему, эта формула так великолепна, что даже не требует более никаких слов. Хотя стоит один раз произнести её на человеческом языке. Итак, формула Эйлера означает, что относительное ослабление света при прохождении мутной среды с оптической толщей равной единице в степени стороны отрезанного квадратного участка дачи площадью 1, умноженной на отношение длины экватора Земли к её экваториальному диаметру равно той самой площади, отрезанной у эсквайра. Сказал бы эсквайр. («*Не ругайте его, читатель, он распишется дальше*» — *Уфф*.) Вместо этой приземлённой формулировки математик произносит: «Эта формула утверждает, что число “e” в степени мнимая единица, умноженное на пи, равно минус единица».

Всегда, пребывая в Ленинград — Санкт-Петербург, вспоминайте, что вы ступаете на землю, на которой наряду с гениальными поэтами и писателями трудился гениальный ученый Леонард Эйлер.

Ну вот, теперь можем возвращаться к нашему Пете и его велосипеду. Чем же отличается время от пространства.

Во-первых, оно одномерно, в нём нельзя гулять вправо-влево, там нет правого и левого. В нем нельзя гулять туда-сюда, только туда, да и это не особенно подчинено нашим желаниям. Поэтому физики решили просто сделать время одномерным мнимым пространством. Первым предложил это бывший преподаватель Альберта Эйнштейна, профессор Минковский, кстати, не принявший студента в аспирантуру, и давший тем самым Эйнштейну свободное, простите за тавтологию, время, чтобы открыть специальную теорию относительности. Теперь в физике есть понятие — пространство Минковского. Это пространство-время, в котором три оси — обычное пространство, а четвертая — мнимое время, умноженное на скорость.

Минковский взял и умножил величину ***ct*** на мнимую единицу. Получились вот такие мнимые сантиметры ***ict***. В общем, время — это какое-то мнимое пространство. Видите, время может быть только потеряно как мнимая длина вашей земли, отрезанная соседями (*«Ну это просто шутка» — Уффф*). Теперь пространство-время можно нарисовать на плоскости, в которой по горизонтальной оси стоит пространство, а по вертикальной — мнимое время, измеряемое в световых единицах. Эту плоскость математики называют комплексной, потому что любая точка на

ней имеет две координаты: одну обычную (пространственную), а другую мнимую (временну́ю). **Квадрат расстояния между точками на этой плоскости может быть и положительным и отрицательным.**

Итак, вернемся к нашему велосипедисту Пете. Два пункта *А* и *Б*, между которыми движется Петя, оказываются уже в пространстве-времени. Что это значит. Пусть Петя выехал 1 июля из пункта *А*. Пока он ехал, пункт *Б* не стоял на месте, а двигался вдоль оси времени в 17 июля. В результате Петя движется по гипотенузе прямоугольного треугольника, у которого один катет лежит на дороге, а второй перпендикулярно ей вдоль оси времени. Этот путь в пространстве-времени называется мировой линией Пети. На рисунке 2 изображена мировая линия пункта *Б* — это просто след его положения при возрастании времени. Пункт *Б* остаётся в одно и том же положении при возрастании времени, так что его мировая линия вертикальна. Мировая линия велосипедиста наклонена вправо.

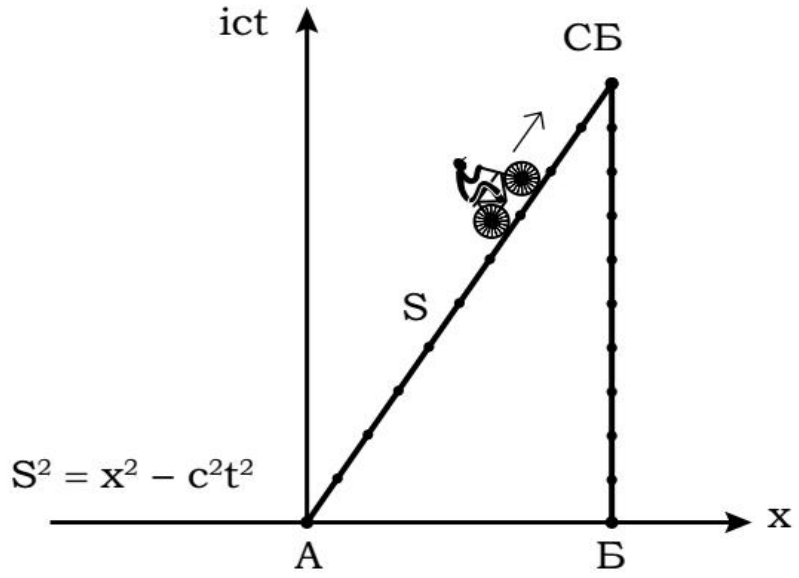


Рис.2

Путь, пройденный Петей, по теореме Пифагора есть сумма квадратов катетов. Только заметим, что при возведении в квадрат мнимой единицы всегда получается –1, и сумма квадратов катетов становится разностью.

Итак, гипотенуза соединяет два события в пространстве-времени, она называется мировой линией: отъезд Пети из Москвы первого июля и приезд в Санкт-Петербург семнадцатого июля.

Так вот, братцы, (это словечко здесь и дальше вставляет *Уффф*), согласно теории относительности, длина этой гипотенузы — интервала — является абсолютной (физики говорят инвариантной) величиной, которая не зависит ни от чего вообще! Т. е. и у Маши, и у космонавтов, мчащихся по орбите вокруг Земли, и у любого другого наблюдателя, это расстояние было бы одинаковым. Эту гипотенузу в пространстве-времени называют интервалом и обозначают обычно точно так же как путь, пройденный человеком, в задаче про велосипедиста — s.

$$s^2 = -c^2t^2 + x^2.$$

В качестве главного постулата специальной теории относительности можно положить постоянство длины интервала между событиями в пространстве-времени и доказать потом, что скорость света постоянна.

До 1905 г. физики считали, что длина отрезка *АБ* в пространстве не зависит от того двигаемся мы или покоимся. А после 1905 г. мы обязаны говорить, что не отрезок в пространстве, а интервал *АБ* в пространстве-времени является величиной универсальной, не подверженной точкам зрения любых наблюдателей.

Кстати, из этого сразу следует эффект изменения длины и времени при движении. Ведь если интервал постоянен, то катеты могут изменяться как угодно, лишь бы их сумма квадратов оставалась неизменной. Отсюда следует, что в зависимости от того покоится или движется наблюдатель, пространство может сокращаться, а время — замедляться! Лишь бы гипотенуза оставалась неизменной.

На самом деле к этому необычному результату подвели работы нескольких гениев физики и математики — английского физика Максвелла, который создал теорию света, и согласно этой теории свет двигался в пустоте с неизменной скоростью; Лоренца, который придумал формулу, по которой изменяются длины и ход времени у разных наблюдателей; Пуанкаре, который создал наиболее общую математическую формулировку принципов специальной теории относительности.

Прости, читатель, за это скучное отступление. Но согласись, затратить несколько абзацев, чтобы понять суть переворота в физике начала XX в., не очень много. Правда, это ещё не все перевороты, которые пришлось пережить классической картине мира в начале прошлого века.

Но вернёмся к Вселенной. Числовое значение скорости света характеризует её прыткость, т. е. описывает динамические возможности взаимодействия физических тел, населяющих её пространство-время. Не зря же астрономы измеряют расстояния в годах! Оказывается, в нашей Вселенной есть не только фундаментальная скорость, но и фундаментальное время!

Почему Вселенная цветная? Все дело в шляпе

Я часто своим студентам советую читать неправильные статьи классиков. Я глубоко уверен, что учась на ошибках великих проще всего понять, как делается наука и научиться делать открытия самому (конечно, большой масштаб ваших открытий не гарантирован, но удовольствие вы получите ни с чем несравнимое). Во-первых, вы поймете, что не боги горшки обжигают, а во-вторых, что в великих открытиях всегда есть Божественное озарение.

Чем отличаются гении от обычных людей? Они не «проходят мимо». Они задумываются над сутью самых обычных явлений и пытаются их понять. Миллиарды людей, живущих на Земле (кроме дальтоников[7]), знают, что мир разноцветный. Ну вот, знают и знают, а почему — даже не задумываются.

Однако 300 лет назад Исаак Ньютон, попытался понять, почему мир цветной. Его мучила загадка: почему Солнце, освещая мир белым светом, делает предметы цветными. Ведь видим мы окружающие предметы с помощью света, отражённого от них. Например, если на полотно замечательного русского художника Кузьмы Петрова-Водкина «Купание красного коня» (1912 г.) падает белый свет, то красный конь выглядит красным, река — голубой, а сам наездник — цвета светлой охры. Понятно, сказал бы Ньютон, на самом деле свет состоит из особых разноцветных частиц — корпускул. Разные

[7] Слово *дальтоники* здесь появилось случайно, но без открывателя этой болезни мы бы не продвинулись дальше первой главы.

предметы дружат с разными корпускулами, считал Ньютон. Забавно, что каждое вещество называется по тому цвету, с которым оно, наоборот, не дружит. Например, красный Марс поглощает, т. е. принимает все 6 цветов радуги, кроме красного. Красные частицы изначально отражаются и летят к вам, дорогой посетитель Третьяковской галереи (ведь именно там купают красного коня). Соответственно река имеет голубой цвет потому, что краска Берлинская лазурь отражает голубые корпускулы света и т. д. Вот и разгадка?! Нет. Объяснение Ньютона было ошибочным!

Природа устроена не так! Найдите на антресолях старую шляпу деда и подставьте её под яркий солнечный свет, наблюдая за тенью на белом экране. Экран наверняка лежит там же на антресолях с момента окончания эпохи диафильмов и слайдов. Постепенно отодвигая шляпу от экрана, в какой-то момент вы увидите посередине круглой тени светлое пятно! Пятно Пуассона[8], как теперь говорят (рис. 4). Если бы свет был корпускулами, т. е. частицами, которые обязаны двигаться прямолинейно, то он бы никак бы не смог обогнуть шляпу вашего деда. А свет огибает, как волны огибают речной бакен на воде.

«Так ведь, наверное, свет это волны!» — воскликнули Гюйгенс с Френелем и придумали волновую теорию

[8] Забавно, что Пуассон придумал этот опыт, собираясь опровергнуть волновую природу света. Согласно волновой теории Гюйгенса—Френеля, всякая точка волнового фронта является источником волны. Таким образом, обод шляпы так же является источником волн. Из-за симметрии, на оси шляпы, волны будут складываться и возникнет яркое пятно. Так говорил, не веря сам себе, Пуассон.

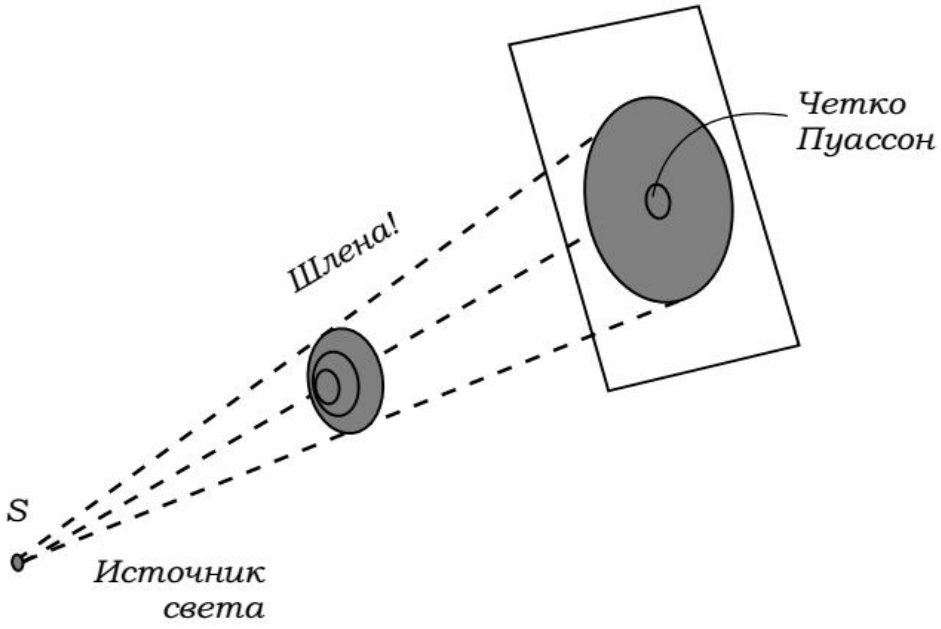


Рис.3

дифракции (огибание шляп и других непрозрачных предметов) и интерференции (сложение и вычитание волн одинаковой частоты, но разной фазы). Волна — это всегда колебания чего-то. Например, волна на реке — это периодический подъём и опускание поверхности воды под действием ветра и силы тяжести. Звук, который мы издаём и слышим — это периодическое сжатие и расширение воздуха, возбуждаемое голосовыми связками, ударами звонаря по колоколу или разрядом молнии. А что такое свет?

Максвелл, которого мы уже упоминали, первым догадался, что свет — это колебания электромагнитного поля (рис. 5). Как и у звуковых волн, у света есть длина волны и частота. Длина — это путь, пройденный светом за одно колебание, а частота — это просто перевернутый период колебаний. Очевидно, («*Любимое слово популяризаторов*» — *Уффф*) ско-

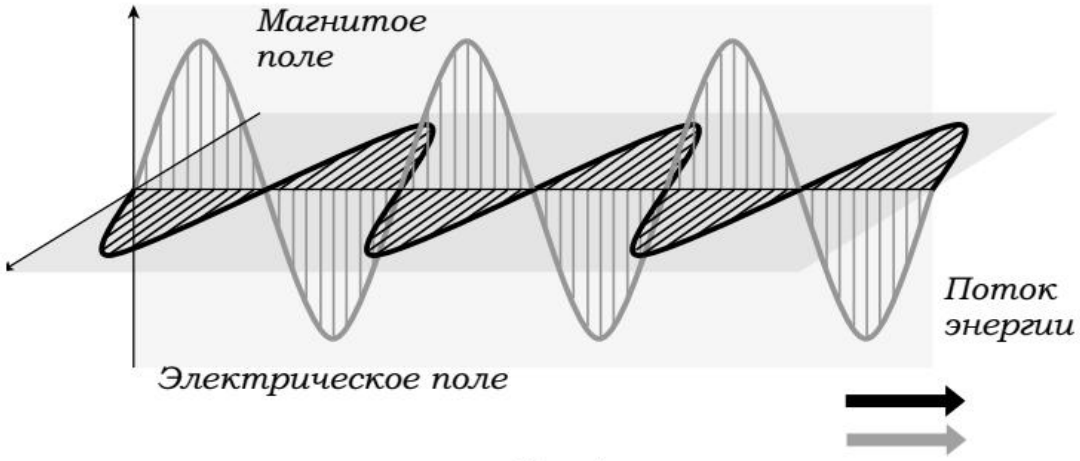


Рис.4

рость света равна длине волны умноженной на её частоту. Для нас важно, что разные цвета соответствуют разной частоте или разной длине волны света. И всё, что говорил Ньютон про отражение нелюбимых цветов веществами — верно. Но цвет переносят волны, а не корпускулы, и теперь цвет можно превратить в сантиметры!!! Или в секунды... Т. е. измерить объективно. А ещё говорят, что на вкус и цвет товарищей нет. (*«Я всегда утверждал, что есть*!» — *Уффф*.) Ведь красный свет обладает большей длиной волны, чем синий. Разница вполне ощутима: длина волны красного света равна 7000 Ангстрем, а синего на 2000 Ангстрем меньше. Единица длины 1 Å (Ангстрем) равна одной стомиллионной сантиметра, что примерно соответствует размеру атома, а Андерс Ангстрем — шведский астрофизик и физик, впервые измеривший длину волны света.

Только не спрашивайте, в чём распространяется свет! В эфире, — говорила физика XIX в., в пустоте, — заговорила физика XX в. вопреки появлению радиоэфира, а сейчас... впрочем, давайте оставим пустоту на потом.

Доплер и Физо люди разные, а эффект у них один на двоих

Пока нам нужно одно важное свойство любой волны, называемое эффектом Доплера—Физо. Представьте себе, что источник волны движется на вас, подобно КАМАЗу, несущемуся навстречу Пете по дороге из Петербурга в Москву. Помните, как завывает грузовик? ЖЖЖЖЖвах! Ведь когда мимо вас мчится грузовик, то его рёв не только нарастает, но и изменяется по высоте звука, т. е. по частоте или длине волны. Сначала вы слышите его звук высоким, а потом, когда грузовик начинает удаляться — низким. Почему изменяется длина волны звука или его частота? Смотрите, источник (ревущий грузовик) совершает периодические возмущения воздуха, посылая во все стороны звуковую волну. Если источник колебаний покоится, вы воспринимаете звук с длиной волны λ_0. Если он движется на вас, то за время одного колебания грузовик приблизится на небольшое расстояние равное произведению его скорости на период колебаний волны: $v_{\text{грузовика}} \cdot \lambda_0 / v_{\text{звука}}$. Следовательно, окончание волны придёт к вам немного раньше, чем в случае покоящегося КАМАЗа, и вам покажется, что период волны уменьшился, частота увеличилась, а звук стал более высоким. При удалении наоборот, расстояние увеличивается, окончание одного колебания приходит к нам позже, длина волны увеличится и звук станет басовитее. Это эффект Физо. Эффект тем заметнее, чем больше отношение скорости источника к скорости звука, т. е. к скорости волны. На этом принципе основано измерение скорости автомобиля полицейскими локаторами. Ведь скорость автомобиля отвечает за изменение длины волны.

То же самое будет с электромагнитными колебаниями. Пока КАМАЗ движется навстречу, свет габаритных огней будет казаться Пете более синим, поскольку длина электромагнитной волны уменьшается, и наоборот, свет покраснеет, когда грузовик будет уноситься вдаль (*«Это ты спер из книги "Физики шутят". Но физики уже давно не шутят» — Уффф*). А это уже эффект Доплера. Если немного подумать, можно догадаться, что изменение длины волны света (как и звука) будет пропорционально самой длине волны. Смотрите, за одно колебание грузовик приблизится (или удалится) на расстояние, равное относительной скорости, умноженной на период волны, а период волны равен длине волны деленной на её скорость. Следовательно эффект Доплера прямо пропорционален длине волны и скорости движения источника относительно наблюдателя (в данном случае Пети). Красный свет смещается сильнее, чем синий!

$$\Delta\lambda \sim \lambda.$$

Вообще-то, в таком виде эффект Доплера не очень удобен. Ведь смещение длины волны будет зависеть от самой длины волны, а также от того, в каких единицах вы будете выражать длину волны: в сантиметрах, метрах, ну или в световых годах. На самом деле, физики предпочитают всегда безразмерные величины — они более объективны и не зависят от таких условностей как системы единиц.

Астрономы — это тоже физики, и чтобы не писать все время дроби придумали новую величину — красное смещение. Красное смещение безразмерно:

$$z = \Delta\lambda / \lambda = v/c.$$

Конечно, Петя не увидит эффект Доплера, потому что скорость КАМАЗа настолько мала по сравнению со скоростью света, что за период колебаний расстояние между источником и Петей практически не изменится.

А вот американскому астроному Весто Мелвину Слайферу удалось измерить эффект Доплера во Вселенной! Но все по порядку.

Химия Вселенной

Люди живут в домах, мыши — в норах, а звёзды — в галактиках. Наша Галактика — Млечный Путь — огромна, 100 000 лет от края до края ехал бы велосипедист Петя, если бы он был фотоном. Но и звёзд в ней немало — примерно сто миллиардов. В среднем по дюжине звёзд на одного землянина. («*Не понятно почему, имея такое богатство, люди никак не могут жить в мире?*» — *Уффф.*) Звёзд много, и вопреки огромным размерам Галактики они сливаются в призрачно светящуюся небесную дорожку цвета парного молока — Млечный Путь. А в миллионе световых лет от нас расположился другой звёздный дом, очень похожий на наш — галактика Туманность Андромеды. Андромеда настолько похожа на нашу галактику, что можно подумать, будто её специально поставили рядышком, чтобы мы могли обозревать наш дом не только изнутри как Млечный Путь, но и снаружи — в виде спирального веретена. Такие галактики, как наша, называются спиральными, в отличие от более-менее кругленьких — эллиптических. Физическая разница между эллиптическими и спиральными галактиками состоит в том, что спиральные вращаются как одно целое, а эллиптические — нет. Во Вселенной ещё есть

третий тип галактик, которые астрономы называют неправильными. («*Всегда то, что не укладывается в простую схему, называют неправильным*» — *Ууфф*.) Эти вращаются, но из-за их малой массы гравитации не хватает, чтобы держать галактику в форме. Правильные галактики имеют правильную, подразумевается, симметричную форму. Неправильные галактики вообще не имеют правильной формы. Они лохматые, неровные, несимметричные и обычно мелкие по сравнению с нашей Галактикой. Типичным примером неправильной галактики являются ближайшие спутники Млечного Пути — Большое и Малое Магеллановы облака. До них всего-то 150 тыс. световых лет. На рисунке представлена фотография Млечного пути и Большого Магелланова Облака над русским телескопом-роботом МАСТЕР (Обсерватория Сазерленд, ЮАР. Фото Евгения Горбовского).

Итак, звёзды живут в Галактиках — туманных пятнышках — туманностях. В XIX в. туманности были подробно описаны французским астрономом Месье («*Они там во Франции все месье*» — *Ууфф*). Он к тому же дал им имена, точнее сказать номера. Например, галактика Туманность Андромеды имеет обозначение **M31**. А вот Магеллановы облака — спутники нашей галактики — в каталоге Месье отсутствуют и называются просто **БМО** и *(См. Вклейку 2)* **ММО** — Большое и Малое Магеллановы облака, соответственно. Буква **М** конечно же означает автора списка, или как астрономы говорят каталога — Шарля Месье. Вообще-то сами объекты каталога мало его интересовали. Его интересовали кометы, а объекты его каталога мешали искать кометы, вот он их и переписал. Долгое время, вплоть до второго десятилетия XX в.,

астрономы спорили, являются ли туманности Месье звёздными городами, или просто сгустками газа и пыли, подобными тем, что в огромном количестве населяют нашу Галактику. В 1920 г. даже состоялась открытая дискуссия в Национальной академии наук США между апологетами этих точек зрения — Шепли и Кертисом.

К счастью, истина вскоре восторжествовала, но не в споре, а в тихих ночных бдениях у телескопа. Пока человечество нормально спало, астрономы научились снимать спектры небесных объектов. Что такое спектр? Спектры видел каждый на небе. Природа устроила человеку одно из самых замечательных по красоте зрелищ — радугу. *(См. Вклейку 3)*

Когда мы говорили про корпускулярную модель света, то для её построения сам Исаак Ньютон, конечно, пользовался не картиной Петрова-Водкина, а оптической призмой. Если подставить под солнечный свет не шляпу, а призму, то на экране возникнет цветная полоска света от красного до фиолетового, называемая спектром. На первый взгляд кажется, что переход между разными цветами и оттенками совершенно гладкий или, как сказали бы физики, — непрерывный. Но если присмотреться лучше в специальной тёмной лаборатории, да ещё и взяв призму побольше, то можно заметить узкие чёрные чёрточки поперёк спектра, наподобие штрих-кода на упаковках товаров в супермаркете. Это спектральные линии. Ещё в XIX в. немецкий физик Йозеф Фраунгофер открыл спектр Солнца, называемый ныне фраунгоферовым. Физики, химики, астрономы — все учёные — были в восторге от открытия линий спектра. Оказалось, что каждый

химический элемент подобно товару в супермаркете, имел свой неповторимый набор спектральных линий, так что, измерив длину волны этих линий, вы сразу могли сказать, какому веществу они принадлежат. По сути, природа, Вселенная, выдали каждому химическому элементу свой штрих код! Допустим, у вас в колбе некое неизвестное вещество, например порошок белого цвета, который нашли на месте преступления. Вы хотите знать, что это. Конечно, можно было бы просто лизнуть его, но вдруг это цианистый калий или полоний, смешанный с солью? Ну вот, после открытия спектральных линий ничего не надо лизать. Просто подогреваете колбу, освещая её пучком света от лампы накаливания. Потом с помощью спектрографа (очень хорошей призмы) находите, что кроме натрия и хлора, ничего там нет, т. е. это обычная поваренная соль. Или наоборот, находите спектральные линии мышьяка, и орудие преступления раскрыто! *(См. Вклейку 4)*

Но больше всех повезло астрономам. Они получили в руки химический анализатор Вселенной. Чтобы сделать химический анализ звезды, вовсе не нужно снаряжать к ней звёздную экспедицию, набирать с риском для жизни образцы звёздного грунта и ждать десятки лет её возвращения. Звезда сама разогреет своё вещество, а свет принесет штрих-код на Землю. Разложив спектр любой звёзды в полоску с помощью спектрографа, вы прочитаете её штрих код и узнаете, из чего она состоит. Именно таким путём мы узнали химический состав нашей Галактики, а позже и всей Вселенной. Оказалось, что самыми распространёнными в ней химическими элементами явля-

ются водород (70 %) и гелий (25 %)[9]. Все остальные химические элементы таблицы Дмитрия Ивановича Менделеева составляют около 5 %.

Закон Хаббла и стахановское движение...

Спектроскопия в астрономии появилась с появлением фотографии. И фотографы, и астрономы на первых порах использовали стеклянные фотопластинки, которые фотографы вскоре заменили плёнкой, а вот астрономы почти век активно пользовались в основном фотопластинками. Дело это было хлопотное, иногда огромное, до полуметра, стекло надо было осторожно вставить в специальную кассету, экспонировать в течении долгих часов. Долгих, потому что астроном не просто стоял у телескопа или пил чай с лаборантками («*Хм!*» — *Уффф*), наблюдатель постоянно крутил винты, чтобы небесный объект не уходил из перекрестья окуляра дополнительной трубы телескопа-гида. Называлось это очень тяжелое занятие гидированием. Дело в том, что раньше у каждого телескопа был гид. Конечно, это был вовсе не человек с табличкой на древке, окруженный группой туристов, которого можно встретить в музеях. Гид у телескопа тоже телескоп, направленный параллельно главному, примерно той же длины, но меньшего диаметра. Астроном-наблюдатель в течение всей экспозиции смотрит в окуляр гида и изредка вращает специальные ручки,

[9] Приведено процентное содержание элементов по вкладу в массу обычного вещества Вселенной. Например, водорода в каждом грамме вещества Вселенной 0,7 г, а гелия — 0,25 г. и т. д.

чтобы опорная звезда не уходила из перекрестья. Так что получается, настоящий гид телескопа — это тоже человек, но его называют астроном-наблюдатель. Но на этом процесс не заканчивался. Далее надо было снять кассету, отнести её в слабо освещённую красным светом комнату (пластинки к нему были малочувствительны), там искупать («*Как красного коня*» — *Ууфф*) её сначала в проявителе, потом в закрепителе, поставить на сушильные козлы и идти спать. На следующий день, на свежую голову, можно было посмотреть, что же на самом деле получилось. В результате, получение снимка занимало минимум одни сутки, а анализ его иногда откладывался на дни, месяцы и годы. Дорогой читатель, я так подробно рассказываю о перипетиях наблюдений XIX—XX вв., чтобы вы представили, как добывались знания о Вселенной в прошлом. И всё это совершенно изменилось сейчас, что позволило перевернуть наши представления о мире.

Пластинки на первых порах были малочувствительные, впрочем, как и на последних, всё в силу принципа их действия. Ещё труднее было снимать спектры. Ведь пока звезда является звёздочкой, весь свет собирается практически в точку, которая легче отображается на фотоэмульсии. А в спектральной полоске световая энергия разжижается и ту же звезду нужно снимать в десять раз дольше. Ну а времени у ночи всего полусуток.

Конечно, сначала учёные получили спектры самых ярких объектов на небе — Солнца и Луны — у обоих он оказался практически одинаковым, и это не случайно, поскольку свет Луны — это отраженный свет Солнца. Но постепенно появлялись более крупные телескопы, и улучшалась чувствительность пластинок.

Таким образом, в начале прошлого века удалось начать съёмку спектров туманностей Месье. Настоящим пионером и «стахановцем»[10] здесь выступил молодой выпускник университета штата Индиана Весто Слайфер — астроном Лоуэлловской обсерватории (с 1916 по 1952 г. — её директор), открывший разбегание галактик. Я не случайно упомянул советского шахтера — рекордсмена Стаханова, подвиг Слайфера был не менее впечатляющим. Простоять 13 ч у телескопа с руками, поднятыми вверх — это подвиг. Кстати, когда в 1914 г. Слайфер докладывал результаты своего труда, на вопрос о том, как ему удалось так долго держать на мушке звезду, он остроумно ответил: «Я держался за телескоп». Но игра стоила свеч! *(См. Вклейку 5)*

Весто Слайфер выяснил, во-первых, что многие туманности имеют типичный звёздный спектр, т. е. туманности это огромные звёздные дома-небоскрёбы Вселенной — галактики! А во-вторых, оказалось, что спектр их слегка отличался от спектра звёзд. Штрих код портился! Причём по вполне определенному закону: спектральные линии смещались неравномерно: красные линии краснели сильнее, чем синие. Штрих код не просто смещался вдоль оси длин волн, а растягивался, как гармошка, неравномерно. Так это Доплер играет на гармошке! — воскликнули

---

[10] Стахановцы — участники Стаха́новского движе́ния в СССР. Стахановское движение — массовое движение последователей Алексея Григорьевича Стаханова — донецкого шахтера. Его последователей — новаторов социалистического производства — рабочих, колхозников, инженерно-технических работников, многократно превышавших установленные нормы производства, стали называть стахановцами.

астрономы вслед за Слайфером и получили кроме химического анализатора ещё и звездно-галактический спидометр.

Вспомним про красное смещение ***z***. Если гармошка растягивается в соответствии с эффектом Доплера, то относительное (в долях) смещение спектра будет характеризоваться только одним и притом безразмерным числом ***z***, что тоже очень удобно.

Итак, ещё в 1914 г. американский астроном уроженец штата Индиана — Весто Слайфер — научился снимать спектры не только соседних галактик. При этом он заметил удивительную закономерность: спектры большинства галактик были сдвинуты в красную сторону! Создавалось впечатление, что они удаляются от нашей Галактики. Галактики не роятся, а разбегаются!

Ну и что, скажет недоверчивый читатель, просто мы оказались в таком неуживчивом рое. Ну не любят нас соседи, вот и разбегаются. А может и боятся?! Конечно, легче всего объяснить непонятное явление, предположив, что оно случайное и не характерное — мол, просто так сложилось.

Но вот в 1929 г. вышла работа Эдвина Хаббла, в которой он утверждал, что галактики от нас не просто разбегаются, а разбегаются по определённому закону. Хаббл заметил, что покраснение света — увеличение длины волны, например линий водорода, тем больше, чем дальше от нас галактика. Но именно это и должно наблюдаться, если скорость убегания галактик пропорциональна расстоянию до них:

$$v = H r,$$

где v — скорость галактики, r — расстояние до неё. Коэффициент линейной пропорциональности H

называется ныне постоянной Хаббла. Опять линейная пропорциональность. Что-то получается у нас всё линейное: эффект Доплера линейный, закон Хаббла линейный, какая-то линейная Вселенная. Ну и что! Вот слава Создателю! Зачем создавать сложное, если можно создать простое! Хотя...

Большой Взрыв или Откуда есть пошла наша Вселенная?

Давайте перевернём формулу закона Хаббла:

$$r = v \cdot 1/H.$$

Конечно, ***H*** возникла потому, что с этой буквы начинается фамилия Хаббла. Сколько эту букву не переворачивай, она не изменится. На самом деле, конечно букву нельзя переворачивать, а вот постоянную можно. В таком виде эта формула вам ничего не напоминает? Попытайтесь вспомнить велосипедиста Петю — длина пути, пройденного Петей по дороге из пункта *А* в пункт *Б*, пропорциональна скорости умноженной на время в пути. Да, но это только при равномерном движении, воскликнет внимательный читатель. Ну да, ну и что, а если под скоростью понимать среднюю скорость, то формула будет и тогда правильной. При этом роль времени в пути будет играть перевернутая постоянная Хаббла. Следовательно, величина, обратная постоянной Хаббла, является временем и измеряется в секундах. Т. е. Хаббл открыл некую постоянную времени во Вселенной! Ну и замахнулся автор. Речь ведь пока идёт хотя и о далёких, но ближайших по масштабам Вселенной, галактиках. Однако, всё дело в том, что за 90 лет проверки справедливости закона Хаббла,

было установлено, что закон «работает» во всей видимой Вселенной. Итак, что же это за время в пути, что это за путь Вселенной? Ответ элементарен: если бы галактики двигались равномерно, то это фундаментальное время было бы просто возрастом Вселенной, как путь, делённый на скорость:

$$T = R/V = 1/H.$$

Представим себе, что в некий момент **Ч**, выбранный равным нулю, в центре координат произошёл мгновенный (очень короткий) взрыв и начался разлёт вещества, причём разлетающиеся осколки летят равномерно, но с разными скоростями. Это так называемый разлёт в пустоту. Очевидно, что те из них, которые летят быстрее, окажутся через время t дальше тех, что летят медленнее.

Таким образом, расстояние от места взрыва, оказывается пропорциональным скорости: $R = v\,t$, или $v = (1/t)\,R$, точно как в законе Хаббла.

Но тогда получается, что формула Хаббла — это формула взорвавшегося мира, а время T — это время, прошедшее от момента взрыва до нашего настоящего, в котором мы, друг читатель, живём.

Например, если устроить салют в космосе, где нет сопротивления воздуха, то разноцветный шар будет расширяться точно по закону Хаббла. Значит окружающие нас галактики это праздничные заряды, которыми кто-то выстрелил в прошлом. Этот, быть может, праздничный салют Вселенной английский астрофизик Фред Хойл назвал Большим Взрывом (парадокс состоит в том, что потом почти всю свою жизнь, он пытался бороться с теорией Большого Взрыва).

Но где же состоялся Большой Взрыв? Очевидно, на месте нашей галактики. Ведь все разлетаются от центра взрыва, а мы стоим себе и покоимся.

Ничего подобного.

Закон мыльного пузыря

Все мы в детстве, а некоторые и не только в детстве, надували мыльные пузыри[11]. Надо сказать, что это самая лучшая двумерная модель нашей Вселенной. Была она придумана первыми популяризаторами[12] Общей теории относительности Эйнштейна. Давайте представим, что наш мир — это поверхность мыльного пузыря, а мы двумерные существа — «плоскатики», которые живут в одной из плоских галактик на поверхности пузыря. *(См. вклейку б)*

Пусть пузырь будет идеально круглым. Каждая галактика прикреплена к пузырю силой поверхностного натяжения и не ёрзает по его поверхности, а мы, читатели этой книги — существа трёхмерного пространства, будем наблюдать за происходящим, а кто-то из нас будет продолжать надувать пузырь. Рассмотрим положение галактик в два разных момента времени (рис. 10). Давайте соединим пробные галактики с центром пузыря. При этом радиусы будут образовывать угол, который не будет изменяться по мере раздувания пузыря. «Плоскатики»

---

[11] Обычно популяризаторы в этом месте надувают воздушные шарики, но мне важно, чтобы здесь подспудно возникла экономическая тема — тема пузыря.

[12] А. А. Фридман в своей книге «Мир как пространство-время» плоскатиков называет тенями или теневыми существами.

этого центра не видят, а вам, читателям, и мне, автору, это видно. Итак, расстояние между галактиками равно отрезку дуги, заключённой между ними. Длина дуги **α** в градусах постоянна, а в сантиметрах растёт пропорционально радиусу пузыря: $R = \alpha a$, где a — радиус пузыря, а **α** — длина дуги в радианах. Отношение расстояний между галактиками в два момента времени пропорционально отношению радиусов пузырей в эти моменты времени.

Следовательно, скорость разбегания галактик пропорциональна скорости расширения пузыря, которую я обозначу вслед за Ньютоном как $\dot{a}$! Получаем: $v = \alpha \dot{a}$. Подставляя угол **α,** получаем закон Хаббла $v = H R$ и заодно значение постоянной Хаббла $H = \dot{a} / a$. Сразу видно, что постоянная Хаббла, как правило (математики говорят, в общем случае) не постоянная и меняется в процессе расширения.

Соответственно, перевёрнутая постоянная Хаббла, универсальное время, не что иное, как время раздувания шара, что вообще говоря, тривиально. Но неожиданно другое.

Мы с вами получили, что закон Хаббла требует симметричности пузыря. Это свойство на его поверхности называют изотропией. Более того на пузыре не должно быть никаких «загогулин», иначе вся эта стереометрия окажется неправильной. Значит, мир должен быть однородным.

Наша Вселенная, как и Вселенная «плоскатиков», должна быть изотропна и однородна.

Точно так же как на поверхности пузыря, в нашем мире, нет избранной галактики. Пересядьте на любую другую галактику, и вы увидите одну и ту же карти-

Две галочки А и Б на поверхности мыльного пузыря!

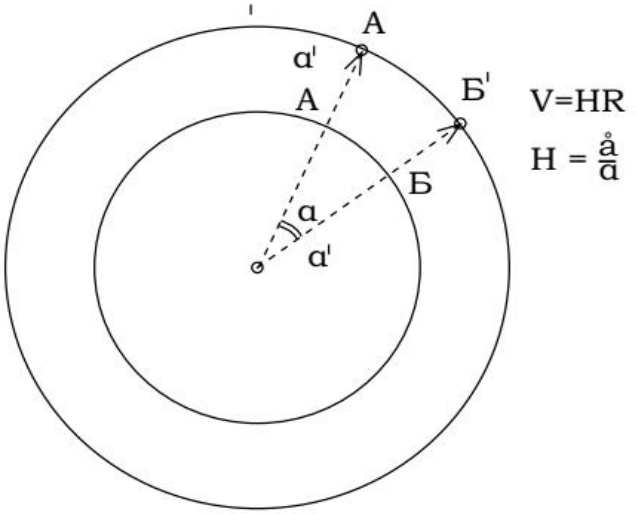


Рис.5

ну — все галактики убегают от вас, да к тому же по закону Хаббла.

Таким образом, обратная постоянная Хаббла — это есть характерное время с момента взрыва, т. е. возраст Вселенной. Согласно измерениям Хаббла, оно оказалось примерно 2 млрд лет. Но позвольте, как же так? Исаак Ньютон и его закон всемирного тяготения против! Ведь его закон касается не только брошенных Галилео Галилеем с Пизанской башни камней, не только Луны и планет, но и далёких галактик. Закон то — всемирный! Раз галактики притягиваются, значит, они разлетаются с замедлением, а при замедленном движении средняя скорость всегда больше наблюдаемой (ведь раньше она разлеталась быстрее). Но если средняя скорость больше, чем сегодняшняя, значит Вселенная ещё моложе! Маловато что-то получается. А откуда тогда взялась старушка Земля со своим преклонным возрастом в 4 млрд лет? Ведь не подбросили же Землю в нашу Вселенную из какого-нибудь пятого измерения.

По современным данным («*Разведки*» — *Уффф*) обратная постоянная Хаббла равна $\mathbf{1/}\boldsymbol{H} \approx 14$ млрд лет — это уже получше, по крайней мере Земля оказывается моложе Вселенной.

Однако где же точка взрыва? Изучая опыт «плоскатиков», мы обязаны заявить, что это точка находится в четвёртом пространственном измерении, которое нам абсолютно недоступно.

Но вернёмся на Землю. Попробуем ещё раз разобраться с открытием Хаббла. Сильно забегая вперед, хочу сказать, что истинное научное значение открытия Хаббла выяснится только к концу нашего повествования о судьбе Вселенной.

Законы Кеплера

Известный немецкий астроном Иоганн Кеплер после окончания Тюбингенской академии был назначен профессором математики и «нравственной философии» в одну из гимназий. Так в 1593 г., т. е. за 17 лет до изобретения телескопа, началась его научная карьера. Впоследствии этот человек проявил себя не только как великий теоретик, но и не менее выдающийся экспериментатор. За 6 лет до того, как Галилео Галилей направил свой телескоп на небо, Кеплер написал книгу о приложении оптики к астрономии(!). Наиболее распространенные сейчас системы школьных телескопов, в которых и объектив, и окуляр — увеличительные линзы, изобретены Кеплером в 1611 г.

Но самые поразительные открытия Кеплер сделал, что называется, «на кончике пера». Кеплер не был теоретиком в современном смысле слова. На современном языке ближе всего к нему подходит определе-

ние «интерпретатор». Говорят, что интерпретатор — это человек, который не наблюдает, но и не строит теорий — он приводит в порядок факты, ищет закономерности. Правда, это не очень точно. Кеплер свято верил в великую гармонию природы. Иногда эта вера заводила его слишком далеко, но в то же время он всегда опирался на четкие экспериментальные данные. А в этом смысле ему особенно повезло.

В 1601 г. Кеплер оказался «наследником» бесценного состояния. В его руки попал архив наблюдений (дневник наблюдений) великого астронома Тихо Браге. Девять лет потратил Кеплер на анализ наблюдений планеты Марс. В те времена ученые не писали научных статей. Не было и периодически издаваемых научных журналов. Поэтому свои исследования ученые излагали в книгах. Кеплер тоже написал книгу, название которой стоит привести целиком: «Новая астрономия, причинно обусловленная, или физика неба, изложенная в исследованиях о движении звезды Марс, по наблюдениям благороднейшего мужа Тихо Браге».

Здесь впервые Кеплер доложил, что Марс движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. Напомним, что эллипс — это плоская кривая, представляющая собой геометрическое место точек, сумма расстояний от которых до двух других его фиксированных точек по-

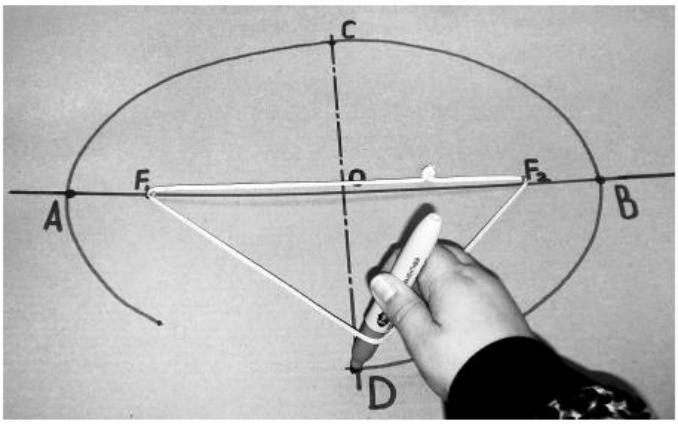


Рис.6

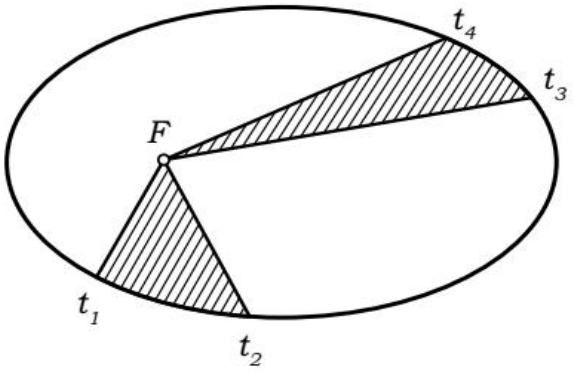


Рис. 7

стоянна. Эллипс легко нарисовать (рис. 6). Возьмите две иголки и наколите их на лист бумаги. Места проколов — это фокусы. Привязав к иголкам нитку, натяните её карандашом. Плавно передвигая карандаш, получите эллипс. Ведь длина нитки постоянна. Вы обязательно должны почувствовать, как невидимая нить гравитации управляет мирами!

Одновременно Кеплер подметил, что движение Марса неравномерное — при приближении к Солнцу он ускоряется, а при удалении — замедляется. Но Кеплер везде искал красоту. Оказалось, что за равные промежутки времени ($t_2 - t_1 = t_4 - t_3$) радиус-вектор планеты описывает равновеликие площади (рис. 7).

Через 10 лет Кеплер написал ещё одну книгу — «Гармония мира», в которой сообщил, что точно так же, как и Марс, движутся и другие планеты. Т. е. все планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце (первый закон Кеплера), и всегда за одинаковые промежутки времени радиус-вектор планеты описывает равновеликие площади (второй закон Кеплера). Читатель может спросить: причём тут красота, гармония? Ну, эллипс, ну, овал — какая разница. А вы нарисуйте эллипс. Он гораздо красивее овала. Вы скажете, что на вкус и цвет товарищей нет. И все же эллипс — уникальная фигура. Потому что эллипс — это тень круга, самой симме-

тричной плоской фигуры. Проекция круга — это не овал, а эллипс. Может быть, поэтому эллипс кажется красивее.

Но есть в законах Кеплера и другая красота, имеющая глубокий физический смысл. Ведь удивительно, почему столь удаленные друг от друга и, казалось бы, совершенно независимые планеты «знают», что им нужно двигаться по эллипсам. Когда мы рисуем эллипс на листке бумаги, все ясно. Есть ниточка, которая держит карандаш. Меняя длину нитки, можно нарисовать много фигур, но все они будут эллипсами. Значит, во Вселенной тоже есть свои «нити». Иоганн Кеплер в этом и видел гармонию и красоту. Он считал, что мир пронизан невидимыми нитями. В этом его убедила третья удивительная закономерность в движении планет. Квадраты периодов обращения планет относятся как кубы их больших полуосей (третий закон Кеплера). Большой полуосью называется половина расстояния между двумя наиболее удаленными друг от друга точками эллипса.

Но что это за невидимые нити? Более или менее это стало понятно лишь в начале XXI в. после работ Альберта Эйнштейна по общей теории относительности. Но ещё в XVII в. Исаак Ньютон значительно прояснил дело, заменив три закона Кеплера одним законом — законом всемирного тяготения.

Ньютон. Гук. Тяготение

То, что не боги горшки обжигают, доказано хотя бы тем, что многие великие открытия сделаны несколькими учеными одновременно. Например, закон

всемирного тяготения, который мы приписываем Ньютону и согласно которому два тела притягиваются с силой пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F = -GM_1M_2/R^2,$$

был независимо (или, просто раньше) открыт Гуком. Именно Гук заронил в гениально-математическую голову Ньютона идею о законе всемирного тяготения. Однажды он написал Ньютону записку, в которой заявил, мол, из законов Кеплера следует, что сила притяжения к Солнцу планет должна убывать обратно пропорционально квадрату расстояния. Таким образом, закон тяготения независимо был открыт другим очень большим физиком, а точнее натурфилософом Гуком — постоянным оппонентом Ньютона. Вообще взаимоотношения Гука и Ньютона напоминали дружбу кошки и собаки: причём не только в научном, но и в личном плане. А может быть и Моцарта, и Сальери, за одним исключением, что Ньютон не отравил Гука, но лишил его лица.

Когда Ньютон стал президентом Королевского общества[13], то тут же приказал сжечь портрет Гука, который как портрет члена палаты лордов висел в Вестминстерском дворце. И теперь мы не знаем, как выглядел Гук. В результате Гук лишился не только закона тяготения, но и потерял лицо. На всё про всё ему оставили только довольно примитивный закон,

[13] Лондонское королевское общество по развитию знаний о природе.

описывающий натяжение пружинки при её растягивании. Но мы ещё попытаемся восстановить справедливость.

Итак, используя астрономические наблюдения Луны и планет, выполненные астрономом Тихо Браге, Иоганн Кеплер открыл свои замечательные законы, из которых и был выведен закон тяготения.

Рассмотрим третий закон движения планет Кеплера: отношение кубов полуосей орбит равно отношению квадратов их периодов. Это факт наблюдательный, можно сказать медицинский.

Масса планеты не участвует в этом законе! Пусть для простоты планеты движутся по круговым орбитам. Центробежная сила (все, кто в детстве катался на каруселях, знают, что она точно существует) создает ускорение v^2/R. Это ускорение испытывает любое вращающееся по кругу тело. Оно отбрасывает тело наружу — от центра. Но поскольку планеты никуда не улетают, значит, что-то их притягивает к центру, и в точности компенсирует центробежное ускорение. Если центростремительное ускорение, создаваемое центростремительной силой, будет изменяться по закону обратных квадратов $\sim 1/R^2$, то и центростремительная сила будет изменяться по тому же закону. Ведь сила — это масса, умноженная на ускорение, согласно тому же Ньютону. Запишем закон Кеплера в виде пропорциональности: $R^3 \sim T^2$.

Разделим левую и правую части на квадрат периода и на радиус в квадрате:

$$(R/T)^2/R \sim 1/R^2.$$

Но R/T — это фактически скорость движения по окружности (ведь длина окружности пропорциональна радиусу и равна $= 2\pi R$), т. е. слева у нас центробежная сила, а справа центростремительное ускорение, т. е. ускорение силы тяготения, и значит, сила тяготения описывается формулой обратных квадратов. Так просто? Да нет, очень непросто. Ведь 300–400 лет назад человеку сложно было представить взаимодействие физических тел без веревок, ремней, шпагатов, цепей и прочих тягловых приспособлений. Ну, скажите, чем таким привязана Луна к Земле, а планеты Солнечной системы к её центру — Солнцу, если между ними не видать никаких таких приспособлений.

Меня всегда удивляют люди, которые считают астрономов какими-то оторванными от жизни полуночниками, обязательно в шутовском колпаке, безобидными и обязательно близорукими. А ведь именно астрономы помогли открыть законы, управляющие полётом искусственных спутников Земли, следящие за вашей машиной, и говорящие «поверните через 400 метров направо, через 200 метров направо, ну уже потом направо на улицу Коперника». Именно астрономы придумали термоядерные реакции, открыли гелий, и сделали атомную бомбу. Отец американской атомной бомбы Оппенгеймер до Второй мировой войны занимался чёрными дырами и нейтронными звёздами.

В общем, с астрономами шутки плохи. Ведь это попросту физики с задранными вверх головами.

Итак, чем же связаны небесные тела, если между ними пустое пространство? Напомню, вопрос этот встал в ту далёкую пору, когда люди ездили на лошадях, писали письма на бумаге, когда кроме сарафан-

ного никакого другого радио, а тем более радиоволн, распространяющихся в вакууме, просто не было. Каким бесстрашием и величием должен обладать исследователь, чтобы предположить существование практически потусторонних связей. Впрочем, может я и не прав, может Ньютону, искренне верующему человеку, и проще было такое представить?

Ну а, возвращаясь к горшкам, хочется сказать следующее. Более десяти лет затратил Эйнштейн на создание уравнений гравитации, опубликовал не одну ошибочную работу и все-таки вывел свои уравнения... на две недели позже математика Гильберта.

Джин выпущен из бутылки

О релятивистской теории гравитации мы ещё поговорим, а сейчас обсудим одну очень важную модель Эйнштейна, в которой впервые автор общей теории относительности (ОТО) нашёл решение своих уравнений для Вселенной как целого. Такие задачи и решения называются космологическими. Космология — наука о самых общих свойствах нашего пространства-времени. («*От этой фразы пахнет плесенью*» — *Уффф*).

Итак, едва получив уравнение описывающее гравитацию, Эйнштейн принялся строить первую космологическую модель мира.

В это время Хаббл ещё не открыл свой закон, а об астрономе Слайфере физики и не слыхивали, и Вселенная никуда не разбегалась. Такой мир, в принципе, нравился Эйнштейну. И не только как физику. Ведь он был сыном XIX века, века революций в Европе и в сознании. Фридрих Ницше, провоз-

гласил, что Бог умер, передовая интеллигенция, поражённая начавшейся научно-технической революцией, пребывала в атеистическом восторге. Библия становилась не модной. Ведь согласно Библии, мир был создан и, следовательно, его когда-то не было. Библейский мир — не стационарен! В пику попам, как выражался Эйнштейн, он создал абсолютно статичную Вселенную, не имеющую ни начала, ни конца! Вопрос о творении больше не стоит! — радовался Эйнштейн.

И все это великолепие полностью описывалось его собственными уравнениями общей теории относительности, которые были подтверждены великим математиком Гильбертом.

Была только в этой бочке мёда небольшая такая чайная ложечка дёгтя. Дело в том, что математические уравнения ОТО великолепно объясняли гравитацию, но допускали существование некой странной постоянной (как говорят учёные, чтобы подчеркнуть незыблемость, — константы), получившей название космологической постоянной, обладающей удивительным и неприятным слуху физика свойством. Оказывалось, что если эта константа положительна, то в мире возникала некая сила отталкивания. Чтобы понять насколько эта константа была неприятна физикам, в том числе и самому Эйнштейну, они никогда в течение всего XX в. не произносили слово антигравитация! Конечно, можно было положить её равной нулю — ведь она практически в малых масштабах была незаметной, и все явления в земных лабораториях никак не зависели от её существования. Но Эйнштейну пришлось её вынуть из забвения, чтобы уравновесить свой статический мир без начала

и конца. Вся Вселенная Эйнштейна, как говорят, космологическая модель, держалась на равенстве сил тяготения и отталкивания, вызванного ненулевой положительной космологической постоянной[14].

Но казалось ненадолго. В холодном, голодном послереволюционном Петербурге, нашёлся человек, который поднял голос против Эйнштейна![15] Это был наш соотечественник — Александр Александрович Фридман. Он нашел, что мир Эйнштейна неустойчив! Стоит слегка подтолкнуть статическую Вселенную Эйнштейна, и она рухнет! Действительно, сила отталкивания (не будем пока применять более правильное слово — антигравитации) в модели была прямо пропорционально размеру Вселенной. Именно такой закон открыл Гук, растягивая пружинки, с той лишь разницей, что сила натяжения пружины пытается её сжать, а сила космологической постоянной — наоборот расправить! Как будто пружина расправляется, а не растягивается! Ну, такое тоже бывает и в полном соответствии с законом Гука! Здесь послышался скрежет зубовный, Гук попытался отомстить Ньютону. Ньютон и Гук снова сошлись в противоборстве. Согласно закону Ньютона, сила притяжения уменьшалась обратно пропорционально квадрату размера Вселенной. Таким образом, если «пнуть» такую Вселенную наружу («*Это куда? — Уффф. — Какая*

---

[14] Как говорил часто Зельдович: «Джин был выпущен из бутылки!».

[15] Возникла даже публичная перепалка между учеными. Эйнштейн, к тому времени Нобелевский лауреат, назвал результат гидромеханика Фридмана ошибочным, но потом все-таки признал его правоту. Ну а Хаббл уже поставил окончательную точку в этом споре.

ещё такая "наружа" может быть у Вселенной?»), сила тяжести уменьшится, а сила отталкивания возрастёт и равновесие нарушится, Гук победит Ньютона и Вселенная начнёт расширяться. И наоборот, если слегка прижать Вселенную — сила тяжести станет всё больше и больше, а сила отталкивания уменьшится, Ньютон победит и Вселенная схлопнется. Таким образом, неподвижная Вселенная невероятна! А если бы Эйнштейн знал работы Слайфера? Но через 6 лет нестационарность Вселенной подтвердил Эдвин Хаббл. Гук победил Ньютона! Подчеркнём, что многие физики вздохнули с облегчением, поскольку космологическая постоянная опять стала ненужной, и Джина обратно затолкали в бутылку. Но запах остался…

Кто от кого убегает?

Все ли галактики убегают от нас? Оказывается, нет. У нашей Галактики есть ближайшие соседи — несколько десятков галактик, среди которых та же Андромеда, те же Магеллановы облака и ещё целая группа однокашников, которых принято называть местной группой галактик. Получается, что не все подчиняются закону Хаббла. А как же мыльный пузырь с его «плоскатиками»? Лопнул? Нет, как раз эти близкие соседи и есть то самое исключение, которое подтверждает правило. Чему научила нас аналогия с мыльным пузырём? Галактики на его поверхности разбегаются в точном соответствии с законом Хаббла только в том случае, если эта двумерная Вселенная абсолютно кругленькая, или говоря научно — однородна и изотропна. Но оглянитесь вокруг себя. Вокруг

полно предметов — стулья, столы, люди, улицы, моря и горы, планеты, звёзды, да и сами Галактики. Разве это вам напоминает полную однородность и изотропию? Нет, конечно. Значит наша Вселенная не четырёхмерная копия круглого пузыря. В малых масштабах — она не однородна! И здесь закон Хаббла не работает и мы сами, и наша планета, и наша Галактика, и локальная группа никуда не разбегаются. Но что удерживает эти объекты от разбегания? Конечно, силы притяжения. В масштабах нашего быта это электрические силы, связывающие молекулы и атомы. А, начиная с масштабов Солнечной системы, это уже сила всемирного тяготения, открытая Исааком Ньютоном. Но ведь тяготение-то всемирное, оно же распространяется до самых дальних окраин Вселенной, а эти края разбегаются от нас, не смотря на силу тяготения.

Все дело в том, что есть связанные системы, а есть не связанные. Чтобы понять, вам дорогой читатель, придётся принять на веру один важный физический постулат, который известен широкому кругу налогоплательщиков за электричество под названием Закон сохранения энергии. Этот закон поселился в физике лет двести назад, сначала на окраине, а потом занял центральное место. Немалый вклад в его становление внес гениальный русский учёный, художник и поэт Михаил Васильевич Ломоносов, предложивший закон сохранения массы в химических реакциях. Например, французский учёный Лавуазье считал, что это не так. К XIX в. закон сохранения энергии формулируется достаточно просто: в замкнутой системе полная энергия не исчезает и не появляется. Парижская академия наук за-

претила рассмотрение проектов вечных двигателей именно благодаря вере в этот закон. И в этом случае не ошиблась. Пока[16].

Рассмотрим замкнутую систему тел в космосе. Это может быть система Земля—Луна, или Земля—Солнце, или вся Солнечная система. С точки зрения механики — эта система описывается лучше всего некими материальными телами малых размеров, связанными друг с другом силой тяготения. Для нас сейчас не важно, как выглядит конкретно эта сила. Важно, только чтобы эта сила достаточно быстро уменьшалась с увеличением расстояния. Энергия такой системы состоит из двух составляющих — потенциальной энергии тяготения U и кинетической энергии движения K: $E = U + K$.

Кинетическая энергия K — это сумма всех кинетических энергий движения, каждая из которых равна массе тела, умноженной на половину квадрата скорости его движения. Поскольку скорость величина действительная (а не мнимая, как световое время), то кинетическая энергия всегда положительна, или, по крайней мере, не отрицательна. Описать движение такой системы подробно — очень сложная «нерешабельная» знаменитая математическая задача — задача *N*-тел. Но ответить на вопрос о судьбе системы гораздо проще. Если полная энергия системы отрицательна, то такая система будет гравитационно-связанная, и она никогда не разлетится:

$$E = Ф + K < 0.$$

[16] В свое время Парижская академия наук запретила принимать к рассмотрению теории, объясняющие падение камней с неба, ссылаясь на то, что это невозможно.

Докажем этот факт от «противного». Допустим, что система с отрицательной полной энергией разлетелась на бесконечность. Это означает, что потенциальная энергия гравитационного взаимодействия стала равной нулю. Но, поскольку полная энергия должна сохраняться, кинетическая энергия должна стать отрицательной, а это невозможно.

Луна никуда не улетает от Земли, Солнечная система не расширяется, Галактика не меняет свой спиральный узор, и Андромеда, как бы ни пыталась, никогда не умчится за хаббловским потоком. Звёзды в галактиках роятся, подобно тому, как роятся галактики в группах галактик, и скоплениях галактик. Однако в больших масштабах Вселенная становится все более и более однородной. И там торжествует закон Хаббла.

Судьба Вселенной

Вообще, предсказывать будущее, как иногда делают цыгане, и как я буду пытаться делать в этой книге, не хорошо. Не хорошо с точки зрения физики, а конкретно, одной из главных её наук — термодинамики. Поэтому, когда приходят студенты или звонят корреспонденты, или спрашивают друзья: «Где ты будешь на следующей неделе в четверг в 13 часов дня?», я ухожу от ответа, укоряя их за попытку нарушить второе начало термодинамики. С этой точки зрения самыми злобными противниками второго начала термодинамики являются составители расписаний поездов, автобусов и самолетов. Не зря они часто ошибаются. И всё же...

Вселенная расширяется. Но как долго это будет продолжаться, не прекратится ли это разбегание,

и Вселенная, подобно камню, брошенному в небо, упадёт обратно?

Конечно, точный ответ на вопрос о судьбе Вселенной, о её глобальных свойствах, решает специальная наука — космология. Современная космология ставит и решает такого рода вопросы на основе общей теории относительности, созданной всё тем же Эйнштейном, — одной из самых сложных физических теорий XX в.

К счастью, что бы снять часть вопросов о судьбе Вселенной, достаточно школьных знаний. Я не зря сравнил разбегающуюся Вселенную с камнем, брошенным в небо. С физической точки зрения, движение камня в поле тяжести Земли и расширение однородной, изотропной Вселенной, абсолютно одинаковые механические задачи. Как же так? Вселенная огромна, она управляется сложнейшими уравнениями гравитации Эйнштейна, она, наконец, кривая, а не плоская! — воскликнет образованный читатель, забегая вперед. Так-то оно так, но спасает её свойство однородности. Давайте мысленно выделим из огромной, быть может, бесконечной Вселенной, небольшой шарик радиусом $\boldsymbol{R}$ (рис. 8). Он настолько мал, что никакие эффекты общей теории относительности не важны. Скорость его расширения много меньше скорости света, размер много меньше горизонта событий, в общем — капля в море! Но как «в капле моря» отражается судьба всей нашей огромной Вселенной, управляемой самыми сложнейшими уравнениями?

А вот шарик можно описать с помощью ньютоновской физики! Помогает одно свойство силы тяготения, подмеченное французским математиком Лапласом.

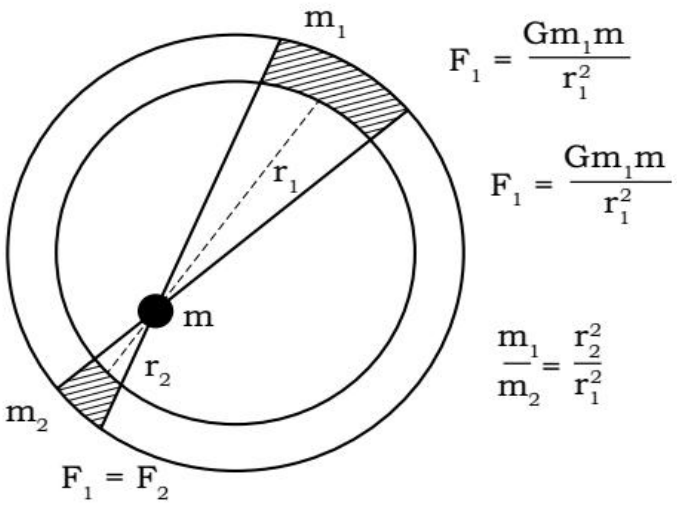


Рис.8

Давайте сначала возьмём шар в пустоте. Пусть шар заполнен однородным веществом. Окружим шар однородным сферическим слоем той же плотности. Как показал впервые Лаплас, этот слой не притягивает шар! Как это не притягивает?! А как же всемирность, и всеобъемлемость закона тяготения Ньютона?! Ну, это я для выразительности сказал. Разные части слоя притягивают любую материальную точку, но все они тянут в разные стороны, и взаимно компенсируют силу тяжести. Это станет ясно, если мы проведём через пробную материальную точку две прямые. Для центра шара все тривиально в силу симметрии. Но для любой нецентральной точки будет то же самое! Согласно формуле Ньютона, слой который дальше, будет притягивать слабее, чем слой, который ближе, причём обратно пропорционально квадрату расстояний. Но тот слой, который дальше, зато больше по объёму в количество раз, прямо пропорциональное квадрату расстояний. В результате силы оказывают-

ся одинаковыми и компенсируют друг друга — внешний слой не оказывает никакого влияния на динамику расширения шарика.

Отлично, но если вся Вселенная однородна, то я могу её представить как огромное количество шаровых слоев, не влияющих на поведение нашей «капли в море»!

Значит, судьба такой Вселенной есть результат решения задачи о расширении шарика в собственном поле тяжести в пустоту. Но делаем последним разящий укол в тело высшей математики и дифференциальных уравнений, неуместных в популярной книге. Есть ещё одна теорема, которая была известна и Ньютону. Дело в том, что шарик радиусом R создаёт такую же гравитацию на своей поверхности, как материальная точка в центре шара на расстоянии, равном тому же радиусу $\boldsymbol{R}$. Но тогда движение поверхности шара (расширение капли, в расширяющемся море) есть движение материальных точек в поле тяжести центрального тела. А это движение — движение камня, брошенного в центральном поле тяжести.

Задача эта, как техническая, впервые была сформулирована русским философом, инженером и мечтателем (есть такая профессия) Константином Эдуардовичем Циолковским. А экспериментально решена духовным учеником Циолковского — генеральным конструктором русской ракеты — Сергеем Павловичем Королёвым в 1959 г. Именно советский космический аппарат **Луна 1** *(См. вклейку 7)* был первой реальной моделью разбегающейся Вселенной, сделанной человеческими руками. Автоматическая межпланетная станция (АМС) «Луна 1» стала первым в мире

космическим аппаратом, достигшим второй космической скорости. Аппарат с прекрасным (не случайным!) рабочим названием «Мечта» был запущен 2 января 1959 г., преодолел притяжение Земли и стал искусственным спутником Солнца[17]. Ответ такой: если скорость на поверхности шара больше второй космической — ракета улетит на бесконечность, а шар туда же будет расширяться бесконечно долго. Если скорость меньше второй космической — ракета поднимется и камнем упадёт обратно. Альтернатива разделена пограничным решением, когда скорость шара в точности равна второй космической скорости. В этом, как оказалось самом, что ни на есть близким к реальности случае шар будет бесконечно долго расширяться до точки покоя, расположенной на бесконечности.

Можно найти этот ответ и по-другому. Вспомним про гравитационно-связанные системы. Если шар гравитационно-связанная система, то он не разлетится на бесконечность, а упадет обратно. Эти две судьбы разделены условием равенства нулю полной энергии шара $\boldsymbol{E + U = 0 : v^2/2 - GM/R = 0.}$ Вот вам и вторая космическая скорость: $\boldsymbol{v = \sqrt{2GM/R}}$.

Но если вернуться к Вселенной и её судьбине, то лучше говорить не о скоростях, а о плотности. Т. е., если вы хотите узнать, будет ли расширение Вселенной бесконечным, вам нужно будет измерить скорость какой-нибудь далекой галактики, подчиняющейся закону Хаббла, далее вычислить вторую космическую скорость, предварительно найдя массу вещества в шаре радиусом $\boldsymbol{R}$. Удобнее ответ формулировать

---

[17] https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D1%83%D0%BD%D0%B0–1

в других терминах, т. е. на другом языке. Но в смысле то же на русском, но по-другому. Ведь Вселенная это все-таки не камень и не ракета! Скорость, с которой расширяется шар в некий момент времени t_0 равна $v = H_0R$, а его масса неизменна и равна $M = 4\pi R^3\rho/3$. Отсюда получается критическая плотность, соответствующая второй космической скорости. Тогда равенство кинетической и потенциальной энергии можно записать так:

$$(H_0R)^2/2 = G4\pi R^3\rho/(3R).$$

Радиус шара сокращаем — судьба шара, как и судьба Вселенной не должна зависеть от его размера, а только от плотности Вселенной! Получаем:

$$\rho_{кр} = 3H_0^2/8\pi G = 10^{-30}\ г/см^3.$$

Получили конкретную цифру, так как подставили сюда значение постоянной тяготения $1/G = 1{,}5 \cdot 10^7\ см^3/(г \cdot с^2)$, и постоянную Хаббла $1/H = 14$ **млрд лет**.

Аналогичным образом можно определить, как изменялась плотность вещества со временем $\rho = 3M/4\pi R^3 \sim 1/R^3$. Но движение шарика сводится к движению двух точечных масс, а такое движение подчиняется закону Кеплера $R \sim T^{2/3}$, значит, плотность на фридмановской стадии расширения Вселенной изменялась по закону обратного квадрата. Точная формула выглядит так:

$$\rho = 1/(6\pi Gt^2).$$

Но удобнее всего плотность Вселенной нормировать на критическую. Так вводится безразмерная плотность Вселенной $\Omega = \rho/\rho_{кр}$.

Еще 30 лет назад[18], когда к нам в институт приезжали журналисты («*Или сумасшедшие*» — *Уфф*) с вопросом («*Или ответом*» — *Уфф*) о будущем Вселенной, наши сотрудники отвечали, что судьба Вселенной зависит от её плотности. На рисунке 9 показана динамическая судьба Вселенной для трёх возможных случаев. Если плотность больше чем критическая, то Вселенная схлопнется через некоторое довольно значительное время, если плотность меньше — Вселенная будет бесконечно расширяться!

В те годы, как и сейчас, плотность вещества, сосредоточенного в звёздах, оценивалась, вполне по-современному, примерно в 3 % от критической плотности, и все мы мирно жили в бесконечно расширяющейся Вселенной.

Эволюция Вселенной

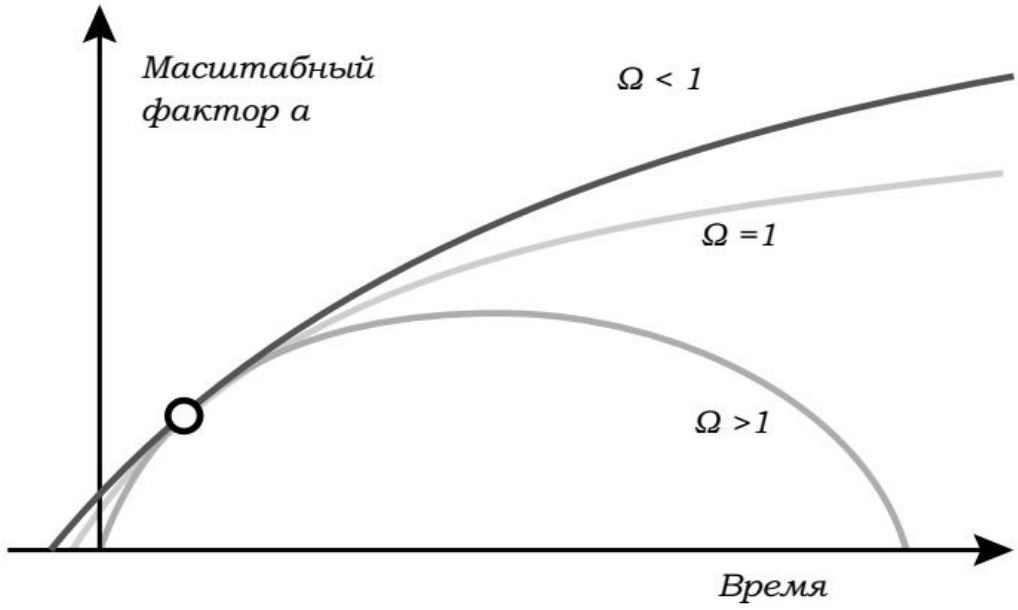


Рис.9

[18] Некоторые известные популяризаторы до сих пор используют этот способ, предсказывая судьбу нашего мира.

Как велика Вселенная?

Итак, наша Вселенная наделена следующими свойствами:

- в ней имеется фундаментальная скорость передачи информации и энергии — скорость света;

- Вселенная расширяется, и расширение её характеризуется неким фундаментальным временем, равным обратной постоянной Хаббла, которое по самым последним измерениям равно примерно 14 млрд лет.

Из этих двух величин рождается размер Вселенной. Подсчитаем размер Вселенной. Сразу скажу — это невозможно. Но возможно посчитать размер области Вселенной доступной нашему взгляду. Очевидно («*Хватит использовать слово-паразит*» — *Уффф*) за время $\mathbf{1/H}$ информация может распространиться на расстояние $\boldsymbol{cT = c/H}$, исчисляемое миллиардами лет. Этот информационный горизонт называют горизонтом Вселенной.

Объём, замкнутый информационным горизонтом, возник в результате Большого Взрыва. Причина Большого Взрыва неизвестна. Такую картину Вселенной научное сообщество приняло уже к концу 60-х годов прошлого века. Это объём, в котором мы живём. И что за ним, за этим горизонтом, можно узнать только косвенно.

Напомним, что используя спектры звёзд и галактик, астрономы уже давно определили средний химический состав вещества Вселенной. Оказалось, что в ней по массе примерно 70 % — это водород, 25 % — гелий, и остальное — тяжелые элементы, включая железо. Все проценты считаются по массе.

Эти проценты тоже удалось достаточно просто объяснить — оказалось, что наша Вселенная не просто однородная изотропная в больших масштабах, но ещё и горячая.

Великая Джаз-банда

Тот, кто нынче любит Джаз,
Завтра Родину продаст!
Народное.

В 20-е годы XX в., в Ленинграде, в университете учились и дружили три молодых человека, каждый из которых оставил глубокий след в развитии физики XX в. — Георгий Гамов, Дмитрий Иваненко и Лев Ландау. Их компанию иногда поддерживал астрофизик Виктор Амбарцумян и очень талантливый молодой астрофизик, которому очень не повезло с фамилией, Бронштейн[19]. В физике это было замечательное, бурное время. В жизни тоже бурное, но скорее трагичное чем, замечательное. НЭП (новая экономическая политика) ещё не закончилась, а революция уже пошла по проторенной ещё Францией дорожке — приступила к пожиранию собственно тех, кто все это затеял. Ну и конечно, зацепила людей, никаким боком не касающихся политики, подтверждая народную мудрость: «лес рубят — щепки летят». *(См. вклейку 8)*

[19] Дело в том, что это — фамилия одного из лидеров октябрьского переворота, который носил партийную кличку Троцкий (в миру — Лев Бронштейн). Впоследствии он был объявлен врагом народа, эмигрировал в Мексику и был убит советским агентом в Мексике.

К этому времени уже разработаны специальная и общая теории относительности (1905, 1916 г.). На повестке дня стояла квантовая механика. Активно развивалась атомная физика, на пороге стояла ядерная… Рушились не только политические устои, но и представления натурфилософские: в физике возникли кванты, рухнуло классическое пространство и время, вот-вот будет создана квантовая механика. Каждый день приносил что-то новое в науке и технике. В биологии русский генетик Николай Константинович Кольцов нарисовал спиральную структуру гена. Ещё не известно строение ядра атома, ещё не открыты нейтроны и позитроны.

Позже Дмитрий Иваненко первым сформулирует правильную модель строения ядра атома, разместив в нём протоны и нейтроны, Ландау — будущий нобелевский лауреат, предскажет существование нейтронных звёзд, построит феноменологическую теорию сверхтекучести, напишет совместно с Евгением Лившицем всемирно-известный курс теоретической физики, в народе прозванный курсом «Ландавшица». Виктор Амбарцумян найдёт ряд важнейших решений в астрофизике по теории распространения света в звёздных атмосферах — очень модная (в хорошем смысле этого слова) в те годы тема. Мы ещё всю эту компанию будем упоминать в книге. Но сейчас обратим внимание на высокого красавца — Георгия Гамова. По воспоминаниям современников, все члены Джазбанды имели клички. Было это модно («*В плохом смысле этого слова*» — *Уффф.*) в то время. Ландау был сокращен до Дау (Лан по-немецки осёл), Иваненко звали Димусом, Бронштейна — Аббатом, а Георгия Гамова звали Джо или Джонни. Как назовёшь корабль, так

он и поплывет. Джо первым вышел на мировую арену, благодаря замечательной работе по теории альфа-распада, и вскоре эмигрировал в Америку. Сам Гамов, впоследствии великолепный популяризатор науки, описал обстоятельства этого открытия в своей научно-популярной книге («Моя мировая линия»). В то время он, аспирант Ленинградского университета, не зная, чем заняться конкретно, вдруг вытаскивает, как сказал бы герой Достоевского — «счастливый билет» — а именно, на него сваливаются деньги и предписание отправиться в германский Геттинген, в один из ведущих мировых научных центров. Вот именно там ему и пришла идея своей первой замечательной работы. Работу признали величайшие физики того времени, среди которых Гейзенберг, Бор и т. д. В России о его туннельном эффекте рассказывают газеты, а пролетарский поэт Демьян Бедный пишет стихотворение, посвященное Георгию Гамову! [20]

> СССР зовут страной убийц и хамов.
> Недаром. Вот пример: советский парень Гамов.
> Чего хотите вы от этаких людей?!
> Уже до атома добрался, лиходей!

По-видимому, это было первое приложение квантовой механики к атомному ядру. «Туннельный эффект» — так красиво Гамов назвал отрытое им явление подбарьерного излучения альфа-частиц радиоактивными веществами. Произошло это в Германии

---

[20] По иронии судьбы, Гамов, как говорится, на своей шкуре испытал классическую непостижимость квантового «туннельного» эффекта, когда дважды пытался пересечь границу СССР, в попытке бежать на Запад.

(в то время, как и в наше, учёные свободно ездили в Европу) — в центр мировой физики. Ведь именно в Германии были придуманы, специальная и общая теории относительности, квантовая механика.

К сожалению, дорогой читатель, я не смогу на пальцах объяснить это явление, поскольку никакого классического аналога данного явления нет. Меня оправдывает лишь то, что никто в мире не способен этого сделать, даже *Уффф*. Постулаты квантовой механики, которые вот-вот появятся на страницах нашей книги, точно так же необъяснимы, как и её замечательные эффекты. Недаром, Альберт Эйнштейн — кстати, сам немало поспособствовавший появлению квантовой механики — так и не признал ее, повторяя совсем не атеистически «Господь Бог не играет в кости». Тем не менее, мы ещё вернемся к туннельному эффекту, когда займёмся судьбой звёзд.

Научное предсказание, о котором мы здесь поговорим, было сделано Гамовым уже в Америке, во второй половине 40-х годов прошлого века.

Шли первые мирные годы после окончания Второй мировой войны. Для нас только закончилась Великая Отечественная, а уже началась Холодная война. Георгий Гамов вошёл в атомный проект США.

В 1953 г. в «Трудах Датской Королевской академии наук» была опубликована статья «Расширяющаяся Вселенная и образование галактик», в которой Джонни предсказал наличие во Вселенной ещё одной компоненты кроме вещества — реликтового излучения — особого микроволнового излучения.

Более того, это излучение, в отличие от излучения микроволновой печки, обладало особыми очень красивыми свойствами — оно было «чёрнотельным».

Царица наук или Главное управление Вселенной

Есть одна великая наука, придуманная целиком в XIX в., которая пережила и классическую механику, и классическую электродинамику, и все разделы физики, которые рухнули в XX в. Да, это самая загадочная и необъяснимая из наук — термодинамика. Она действительно продолжает царствовать в физике, и все другие теории, включая специальную и общую теории относительности, и квантовую механику, и релятивистскую квантовую механику, и даже все последние ещё незавершённые теории, и даже теории неправильные, все они спрашивают позволения быть рассмотренными сначала у Термодинамики. Создавалась она постепенно ещё от работ Галилея, Ньютона, Ломоносова, Лавуазье, к окончательной формулировке в XIX в. Клаузиусом, Гельмгольцем, Гиббсом и, конечно, великим Больцманом. Именно в XIX в. были сформулированы постулаты этой науки, которые не изменились и в наше время. А ведь погибло почти всё из тысячелетнего опыта человека — рухнуло классическое абсолютное пространство, погибло классическое время, стало размываться и расползаться и эйнштейновское пространство-время... А термодинамические постулаты стоят недвижимо. Их назвали началами! Первое начало термодинамики, второе... ну и в XX в. Нернст добавил третье...

Меня всегда поражало, как из примитивных чугунных поршней и цилиндров, из воды и пара, из пропахших горящим маслом червячных пар и шестерёнок рождалась эфемерная, витающая в абстрактных облаках метатеорий, наука термодинамика. И каким

образом сие механическое чудовище, в виде самодвижущихся экипажей, паровозов и пароходов, могло извергнуть столь фундаментальные истины, не подвергнутые сомнению ни Эйнштейном, ни Планком, ни Гейзенбергом со Шредингером («*Браво!*» — *Уффф*). На вклейке 9 показано самое красивое самодвижущееся устройство — паровоз — Триумф термодинамики!

Пока нам хватит первого начала — оно более понятно, т. е. более привычно, ибо постулат не может быть понятен. Это закон сохранения энергии в термодинамической формулировке.

А ещё, в качестве Ууффа *(«Как это?!» — Уффф)* нам понадобится специальное устройство — эдакая палочка-выручалочка — цилиндр с поршнем, без которого не обходится ни одна паровая машина. Это замечательное устройство является одним из самых эффективных инструментов для объяснения огромного многообразия физических явлений от самодвижущихся экипажей до расширяющейся Вселенной.

Присмотримся к энергии. Термин энергия, которым мы постоянно пользуемся в жизни, и к месту, и ради красного словца[21], не является столь уж древним. Например, ещё XIX в. для описания механической энергии физики часто употребляли слово «живая сила».

Самый простой вид энергии — это кинетическая энергия тела массой m, движущегося со скоростью v:

$$K = mv^2/2.$$

[21] Например, в конце прошлого века, в так называемом шоу-бизнесе, энергия, энергетика стали самыми паразитными словами. По простоте душевной шоу-звёзды к месту и не к месту употребляют это слово для характеристики музыкальных номеров.

Благодаря нашему опыту, приобретённому ещё в детстве, когда мы со скоростью ***v*** летели кубарем с велосипеда, у которого отвалилось переднее колесо, мы хорошо помним зависимость боли от квадрата скорости нашего движения. Но тот же велосипедист Петя помнит, что можно никуда не ехать, а шишек все равно можно набить. Например можно упасть с дерева. Падать лучше с меньшей высоты. Это потому, что в мире существует потенциальная энергия тяготения. На земле она просто равна ***mgh*** (*Уфф*). Эту энергию называют «эмжеаш», тогда и энергия, и формула запоминаются одновременно. При падении с высоты ***h*** сумма потенциальной и кинетической энергий сохраняется, и в момент приземления, когда «эмжеаш» превратится в ноль (***h*** = **0**), кинетическая энергия станет максимальной. А, понятно, — скажет сообразительный читатель — поэтому она и называется потенциальной, т. е. она как бы угрожает превратиться! В термодинамике же люди имеют дело не с телом, а с некими термодинамическими системами. И здесь появляется внутренняя энергия термодинамической системы. Встряхнем головой, включим «упроститель *Уффа*», и заменим слово «термодинамическая система» словом «газ». Это поближе будет. Ведь газом можно дышать и его можно нюхать. Что такое внутренняя энергия газа? Обратимся к поршню (рис. 10). Представим себе, что он стоит вертикально и на него действует сила тяжести, и он никуда не двигается, т. е. находится в равновесии.

Что будет с поршнем, если снизу включить горелку. Газ нагреется, давление возрастёт, и поршень поднимется на высоту ***h,*** приобретя энергию «эмжеаш». Но ведь ***mgh*** — это потенциальная энергия, которая

может перейти в кинетическую, а кинетическая нам понятна из детства!

Следовательно, тепло — это такая энергия, которая зависит от температуры и которая может перейти, например, в механическую энергию. Так вот, первое начало термодинамики гласит: изменение внутренней энергии газа ΔU равно работе A сил давления, взятой с обратным знаком (ведь когда газ расширяется, он работает и расходует свою внутреннюю энергию), плюс количество теплоты, полученное от горелки: $\Delta U = -A + \Delta Q$. Итак, здесь всё понятно. Но как посчитать работу силы давления газа на поршень? Вспомним, что давление — это сила на единицу площади, например на квадратный сантиметр. Тогда если давление p умножить на площадь поршня, получим силу. А работу силы знает каждый школьник, она равна силе, умноженной на путь h. Получается, что работа равна давлению, умноженному на площадь и на путь. Пусть поршень поднимется на высоту h. Но если не спешить умножать давление на площадь, а сначала умножить площадь поршня на путь — то получится изменение объёма газа, и первое начало

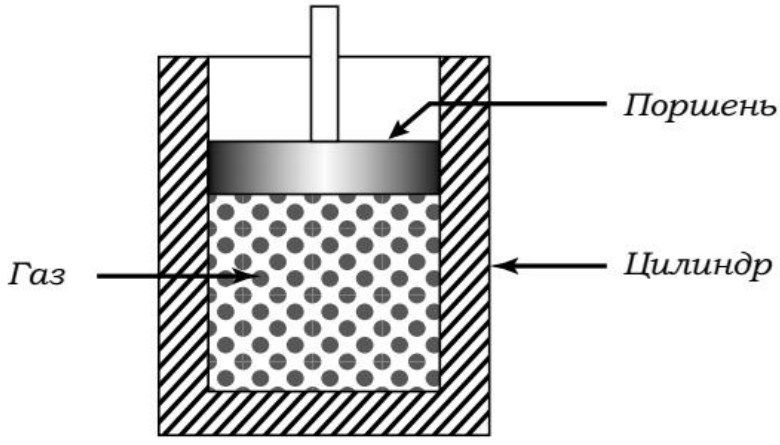


Рис. 10

термодинамики можно переписать в виде: изменение внутренней энергии газа равно произведению давления газа на изменение объёма плюс количество теплоты, полученное от горелки:

$$\Delta U = -p\Delta V + \Delta Q\ .$$

Но теперь делаем последний удар упростителем формул *Ууффом.* Ведь расширяющийся объём газа внутри цилиндра — это и есть наша Вселенная, братцы. Но нашу Вселенную никто снаружи не нагревает и $\Delta Q = 0$. Всегда! Количество теплоты не изменяется, ведь у Вселенной этой «наружи» по определению Вселенной нет. Следовательно, царственная наука термодинамика указует, что бы ни происходило с газом Вселенной, из каких бы только непонятных частиц она не состояла, всегда должно выполняться условие:

$$\Delta U = -p\Delta V$$

и точка. Здесь U — полная внутренняя энергия газа заполняющего Вселенную, а V — её объём.

Абсолютно чёрное тело, русская печь и термодинамическое равновесие

Все непонятное завораживает. Так очаровывает меня, дорогой читатель, термодинамика. Её чугунные законы двигают паром и Вселенной. В них отражается загадочный свет далёких заоблачных истин, смысл которых быть может станет понятным нам только через многие столетия. Поверьте, истинное удовольствие описывать термодинамику в популярной книге. Ведь в научной статье, нам никто не позволит сравнить построенную модель с симфонией или оперой. Хотя...

Великий физик Больцман в своих статьях где-то между гениальными формулами писал: «А теперь в дело вступают валторны и скрипки, звучат ударные, уступая место трубам...». Не дословно, конечно. Ну, кстати, мы обязательно ещё вернемся к Больцману, ведь Вселенная — это пространство и время, но нельзя говорить о времени, не упоминая Больцмана.

Я уже говорил, что в любой формальной системе: геометрии, алгебре, механике, теории относительности и т. д. — присутствуют высказывания-постулаты, их ещё издревле называли началами. Но наряду с постулатами, обязательно нужны понятия или объекты. Например, в механике присутствует понятие материальная точка, а в геометрии математическая точка, или линия, или плоскость и т. д. А ведь никто никогда не видел математическую точку! Да и как можно увидеть точку, если у неё нет никакого размера? А кто видел линию? — ведь она абсолютно тонкая. Не соткать из математических линий ковер. Точка, линия — абстракции. Некие идеальные невесомые объекты. Тем не менее, геометрия великолепно работает. Благодаря геометрии построены величайшие памятники цивилизации — египетские пирамиды, великий Парфенон, собор архитектора Гауди в Барселоне, здание МГУ имени Михаила Васильевича Ломоносова. Ни одна вещь не попадёт на прилавок, не будучи предварительно изображенной на чертежах в виде несуществующих отрезков, кругов и символов.

Вот и в термодинамике, без которой не поехал бы ни один автомобиль, существуют идеальные понятия. Одним из таких понятий является термодинамическое равновесие. Ха, скажет велосипедист Петя. Тоже мне бином Ньютона! («*А это он слямзил у Михаила*

Афанасьевича!» — *Уфф*.) Пока ты в равновесии — ты едешь, а как только потерял равновесие — ты падаешь. Ну, в общем — да. Ведь термодинамическая система, тот же газ — тоже ездит из пункта *А* в *Б*, но не по мировым линиям в пространстве-времени, а в пространстве давлений, температур и объёмов.

Хотя абсолютного равновесия в природе не бывает, я всё-таки дам его определение: термодинамическим равновесием называется состояние системы, в которой отсутствуют потоки тепла и энергии. Ну, хорошо — это некое состояние, а где же идеальные объекты термодинамики. Есть такой — это чёрное тело и его излучение!!!

А вот вы знаете, почему самая вкусная каша готовится в русской печи? Ни на одной конфорке, ни в одной микроволновой печи такую кашу не приготовишь. Все дело в том, что пока готовится каша, она пребывает в термодинамическом равновесии. И томится[22] в нём. Конечно, почти в равновесии, почти в идеальном. Русская печь является почти идеальным образцом физического прибора под названием термостат. Принцип работы термостата состоит в следующем. Источники тепла в нем равномерно располагаются вокруг некой полости — рабочего объёма. Поскольку источники тепла снаружи — полость прогревается однородно и изотропно. Внутренность приобретает одинаковую температуру. Так же работает русская печь, в которой вначале толстые стенки из

[22] Какое чудесное слово придумано в русском языке про кашу — «томиться». Это редкий случай — придавать физическому процессу человеческую окраску. Вспоминается Галилеева «воля» материальных тел сохранять бесконечно долгое прямолинейное движение.

кирпича прогреваются дровами, после чего печь долго не остывает, и в её рабочем объёме стоят изотермические горшки с гречневой кашей, щи, и пекутся пироги. А на печи есть специальное лежбище — завалинка — где хорошо зимой лежать, греться и думать о холодных глубинах Вселенной.

Конечно, не построишь в физическом институте русскую печь. Поэтому в физических и химических лабораториях применяют термостаты. Кстати, лаборантки названных выше специальностей обожают готовить цыплёнка именно в термостате — здесь он прожаривается гораздо равномернее, чем в микроволновой печи. Потому как термодинамическое равновесие. Ну а теперь к чёрному телу. Только не подумайте, что я имею в виду пережаренного сгоревшего цыплёнка в термостате, хотя почему и нет!?

Положим некое тело в термостат. Через некоторое время оно — тело — войдёт в термодинамическое равновесие. Равновесие означает, что с каждой единицы поверхности тела в единицу времени уходит ровно столько энергии, сколько поглощается. Иначе бы температура цыплёнка росла, и равновесия никакого бы не было.

Введём коэффициент отражения A тела. Очевидно, что тело поглотит долю излучения $1 - A$. И, следовательно, отразит меньше излучения, чем падает. Но если $A = 0$, то падающая и излучённая энергии уравняются и тело придёт в термодинамическое равновесие.

Астрономы коэффициент A называют загадочным словом альбедо. Так вот, падающая энергия равна отражённой только в том случае, если альбедо равно нулю $A = 0$. Но коэффициент отражения равен нулю только

у чёрного тела! Кстати, одно достаточно чёрное тело, которое обожают воспевать поэты, видели почти все! Это Луна — спутница Земли. Её поверхность чернее сажи, а альбедо равно всего лишь $A = 0{,}07$! Вот потому и то излучение которое испускает тело и то, которое оно поглощает в термостате, называется чёрнотельным излучением. Чёрнотельного излучения в природе не бывает, потому что нет идеального равновесия: посмотрите, как скачет температура днём и ночью, зимой и летом.

Да, в природе нет идеального чёрнотельного излучения, как нет математической точки или идеальной прямой. Но можно создать состояние равновесия очень близкое к идеальному. Лучшим примером чёрного тела является дырка в бочке, которая давно лежит под солнцем и равномерно прогрелась. Ведь дырка ничего не отражает! Её альбедо равно нулю. Это не шутка про дырку. Собственно так устроено лабораторное чёрное тело. Впервые чёрные тела появились в физических лабораториях в XIX в. Именно с помощью одного из таких устройств в 1879 г. австрийский физик Стефан экспериментально открыл закон Стефана—Больцмана (Больцмана звали Людвигом, а не Стефаном. Стефана звали Йозеф). Плотность энергии чёрнотельного излучения пропорциональна четвёртой степени температуры:

$$u = U/V = aT^4.$$

Здесь константа a — постоянная Стефана—Больцмана.

Через 5 лет ученик Йозефа Стефана — Людвиг Больцман — теоретически обосновал этот закон. И это явилось настоящим чудом.

Поделим термостат пополам

Именно Больцману впервые удалось нащупать основные свойства чёрнотельного излучения — однородность, изотропию и отсутствие поляризации. Более того, оказалось, что существует универсальная функция, описывающая распределение цветов в спектре излучения чёрного тела. Хотя эту функцию не удалось найти в XIX в., но удалось выяснить её свойства и даже, прости, читатель, проинтегрировать! («*ААААААААААААА! Не прощайте его!*» — *Уффф*) Функцию, описывающую это распределение, обозначим через B_ν и докажем, что она зависит только от двух величин — длины волны (или частоты ν) и температуры. Призовём на помощь старика *Уффа*. Он советует проделать несколько мысленных экспериментов с двойным термостатом, который можно сделать из обычного термостата, разделив внутреннее пространство пополам толстой непрозрачной перегородкой. Две полости $П_1$ и $П_2$ в принципе могут быть сделаны из любого материала (рис. 11).

Сделаем в перегородке небольшое отверстие, которое настолько мало, что существенно не изменяет внутреннюю энергию в каждой из полостей. Подвигаем мысленно слегка перегородку — если бы излучение было неоднородным, в какой-то момент побежала бы энергия из одной полости в другую, что невозможно при термодинамическом равновесии.

Докажем, что равновесное излучение изотропно. Для этого вставим в маленькое отверстие трубочку, под произвольным углом к перегородке. Трубочку можно крутить. Если бы равновесное излучение было бы анизотропным (неодинаковым по направлениям), то через

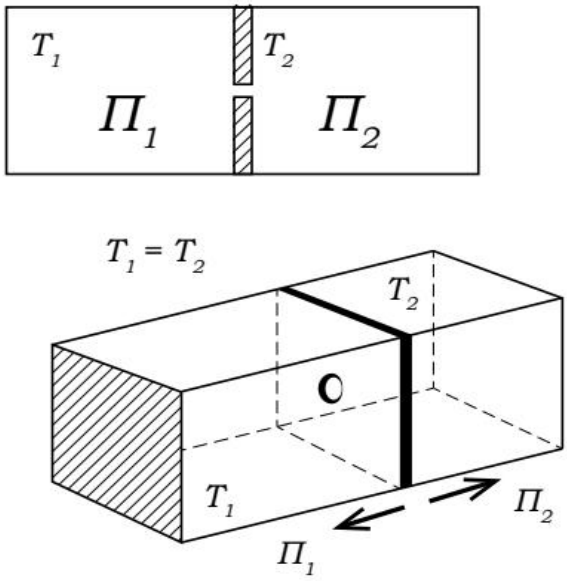


Рис.11

трубку потекла бы энергия, а это невозможно, так как в равновесии не бывает никаких потоков энергии.

Точно так же, вставляя в отверстие фильтры разного цвета, можно доказать, что в равновесии цветовой состав излучения одинаков и не зависит от вкуса, запаха, химического состава и т. д. вещества термостата.

Труднее с поляризацией. Поляризация — одно из свойств света, которое присуще только волне. Напомним, что, согласно теории Максвелла, свет — это волна электромагнитного поля. Причём электрическое и магнитное поля в волне всегда взаимно перпендикулярны. Свет называется поляризованным, если электрическое поле колеблется в некоторой преимущественной плоскости. В обычном свете нет преимущественных плоскостей. Но если обычный свет пропустить через поляризатор, то из него выйдет уже поляризованный свет. На самом деле, уважаемый читатель, многие из вас каждый день сталкиваются с очень похожим явлением — поляризацией пластиковых кар-

точек при входе в метро[23]. Пока проездные карточки (раньше говорили, билеты) лежат в карманах (задних, боковых, передних) или сумочках пассажиров, их множество не поляризовано! С равной вероятностью плоскости карточек разнонаправлены. Но вот в момент, когда пассажиры прикладывают их к считывающему устройству в метро — все карточки становятся параллельными. Карточное множество поляризуется!

Давайте теперь возьмём световой поляризатор и вставим в маленькое отверстие между половинками термостата и будем его вращать, меняя плоскость поляризатора. Если бы равновесное излучение было поляризовано тут же бы оказалось, что в левой и в правой половинках плоскости поляризации не совпадают, и возник бы поток энергии, т. е. получилось бы, что энергия переходит от одного тела к другом при равенстве их температур. Это бы нарушило равновесие.

Итак, мы с вами открыли универсальный идеальный объект — равновесное излучение — оно изотропно и однородно, оно не поляризовано, оно описывается некой функцией зависящей только от двух физических величин — температуры и длины волны. Все. Ни от химического состава, ни от цвета, ни от вкуса, запаха тел, положенных в термостат, оно не зависит.

Свойство чёрнотельного излучения не зависит и от предыстории! Другими словами, равновесное излучение может быть приготовлено тысячью способами и будет всегда одним и тем же. Можно сказать и так: «Световой газ забудет прошлое в процессе установле-

[23] Лет тридцать назад, когда я написал книгу «В мире двойных звёзд» для серии «Библиотечка Квант», я использовал такую же аналогию, но там фигурировали пятачки. Да, братцы, 5 копеек стоил проезд в метро.

ния равновесия». Что значит забудет? Значит, что информация о способе приготовления будет полностью забыта. Следовательно, информация в термодинамических процессах теряется! Это удивительное свойство мира уже связано со вторым началом термодинамики, о котором мы поговорим в том месте, где без этого обойтись уже будет нельзя никак. А такое место обязательно возникнет, так как книга наша называется «От Большого Взрыва до Великого Молчания».

А пока нам понадобится одна, важнейшая для нашего понимания Вселенной, формула. Эту формулу вывел Больцман в 1884 г. Больцман вывел несколько великих формул, но эта чудесна тем, что демонстрирует величественную царственность термодинамики в полной красе. Ведь свет это тоже газ, его можно поместить не только в термостат, но и под поршень, и он будет давить и сопротивляться как воздух! Это доказал русский физик Пётр Николаевич Лебедев, который первым обнаружил давление света экспериментально.

Давайте поместим равновесный газ внутрь поршня. Свет, падая на поверхность поршня, будет поглощаться и тут же излучаться, чтобы сохранить термодинамическое равновесие. В результате поршень почувствует отдачу, потому что волна как бы отразится от него.

Пусть внутренняя энергия светового газа равна U. Энергия в единице объёма — плотность энергии — будет $u = U/V$. Замечательно, что плотность энергии измеряется в атмосферах, в миллиметрах ртутного столба или паскалях, как давление. И наоборот, давление можно измерять в джоулях на кубический метр или в эргах на кубический сантиметр, т. е. так же как плотность энергии! Это не случайно. Смотрите, давление это сила, делённая на площадь. Давайте силу,

деленную на площадь, сначала разделим на расстояние, а потом умножим на такое же расстояние — в результате в числителе появится сила, умноженная на расстояние, пройденное поршнем, т. е. работа или энергия, а в знаменателе появится объём. Так может, $p = U/V = u$!? К сожалению, нет. Это было так, если бы весь свет шёл в одну сторону (как из лазерной указки), а у нас ведь равновесное изотропное излучение — оно одинаково распространяется по трём сторонам. Значит, давит он в три раза слабее! Т. е. получается вот такое уравнение для равновесного излучения. Его давление равно плотности энергии, делённой на 3:

$$p = u/3 .$$

Связь давления с плотностью газа (неважно с плотностью энергии или с плотностью массы) называют уравнением состояния. Значит то, что мы вывели — это уравнение состояния светового равновесного газа или, как теперь говорят, уравнение равновесного фотонного газа.

Но как вывести формулу для плотности энергии u? Формулу Стефана—Больцмана. Очевидно, нужно сложить все цветные волны, при этом останется только зависимость от температуры. Чтобы найти формулу зависимости плотности энергии от температуры, надо знать цветовой состав излучения, т. е. распределение энергии в спектре по длинам волн $B_\lambda(\lambda, T)$. Напомню, что мы в нашем повествовании находимся в 1884 г., а спектр чёрнотельного излучения станет известным только через 16 лет в 1900 г., когда появится работа Макса Планка. Причём спектр, который впервые выведет Планк, введя квантование энергии, фактически обрушит классическую физику. Но оказывается, для вывода закона

Стефана—Больцмана вовсе не нужно знать квантовую механику. Потому, что термодинамика важнее (царица наук)! Нам понадобится опять только термостат, поршень и *Ууфф*. Пусть под действием давления поршень плавно выдвигается, и объём газа начинает возрастать. Но тепло через поршень не выходит наружу. Тогда согласно первому началу термодинамики мы получаем:

$$\Delta(uV) = -(U/3)\Delta V.$$

Поделим обе части уравнения на полную внутреннюю энергию

$$U = uV : \Delta U/U = -(1/3)\,\Delta V/V.$$

«Что-то похожее на дифференциальное уравнение получилось, — скажет студент второго курса физического факультета, — интересно, как тут выкрутится автор». Да просто, у меня же есть *Ууфф*. Давайте рассуждать здраво, и все получится. Проговорим уравнение словами. Если объём, занятый чёрнотельным излучением, увеличится на одну долю от начального значения, то энергия уменьшится (там минус стоит) в три раза по сравнению с начальной! Это означает, что энергия пропорциональна обратному корню кубическому из объёма:

$$U \sim 1/V^{1/3}.$$

Если объём раздувается однородно и изотропно, т. е. по закону шара $V \sim R^3$, то получаем удивительное соотношение:

$$u \sim U/V \sim R^{-4},$$

и в адиабатном состоянии уравнение состояния светового газа будет $u \sim V^{-(4/3)} \sim \rho^{4/3}$.

Хорошо, мы здорово продвинулись. Но как получить закон Стефана—Больцмана, не зная квантовой механики? Все дело в том, что термодинамике нет никакого дела, что там скажет квантовая механика.

Давайте призовём *Уффа* с его термостатом. Возьмём наш двойной термостат с перегородкой, заклеим дырку и позволим перегородке двигаться туда-сюда, подобно поршню. Пусть в левой половинке останется чёрнотельное излучение, а правую наполним обычным газом. Раз уж мы вывели уравнение состояния светового газа, то грех нам не воспользоваться школьным выводом уравнения состояния идеального газа. Предположим, что газ состоит из молекул, и те подобно шарикам носятся по пространству, иногда сталкиваясь друг с другом. Газ считается идеальным, если между столкновениями молекулы движутся равномерно и прямолинейно, т. е. если они не чувствуют притяжения своих соседей. Фактически это означает, что кинетическая энергия молекул намного больше потенциальной энергии их взаимодействия. Поведение молекул идеального газа подобно движению пьяного человека, заблудившегося в лесу. После каждого столкновения с очередным деревом он абсолютно забывает, куда двигался до того. Такое беспамятство молекул называется гауссовским процессом, а движение молекул называется броуновским. Можно показать, что при броуновском движении расстояние, пройденное от начальной точки, растёт не пропорционально времени, как, например, у велосипедиста Пети, а как корень квадратный из времени. Апологетом молекулярного строения вещества был Людвиг Больцман, он впервые и связал термодинамические понятия с кинетической энергией молекул:

$$mv^2/2 = (3/2)kT,$$

где k — постоянная Больцмана (уже без Стефана). Импульс при этом пропорционален $\sqrt{Tm}$.

Вспомним, что разделив энергию движения на объём, мы получим плотность энергии, которая всегда пропорциональна давлению. Разделим и умножим последнее равенство на объём. Тогда в левой части получится уравнение идеального газа, которое независимо открыли Менделеев и Клапейрон.

$$p = \text{const}\ T/V.$$

Если мы просто умножим среднюю кинетическую энергию движения молекул на число молекул, то получим полную внутреннюю энергию газа.

Отсюда очевидно (здесь даже *Уффф* не нужен) следует, что внутренняя энергия идеального газа в объёме V просто пропорциональна температуре $U \sim pV \sim T$. Давайте в нашем двойном термостате слегка пошевелим перегородкой, как поршнем. При этом полное количество теплоты сохраняется благодаря толстым стенкам термостата. Т. е. будем рассматривать адиабатный процесс. Если объём светового газа увеличится, то вся работа газа уйдёт на повышение внутренней энергии обычного газа. Перепишем первое начало термодинамики ($\Delta U = -p\Delta V$) в виде пропорциональности: $\Delta T \sim -p\Delta V = -U\Delta V/3V$, а теперь вспомним что $U \sim 1/V^{1/3}$ и получим $\Delta T \sim \Delta U$. Полная световая энергия в объёме V пропорциональна температуре $U \sim T$. Но световая энергия в единице объёма $u = U/V \sim T^4$. *Уффф*! Есть закон Стефана — Больцмана!

Еще раз повторю, что мы не использовали ни одного уравнения XX в. при выводе уравнения Стефана — Больцмана! Мы даже не использовали функцию, описывающую цветовой состав спектра чёрнотельного излучения, B_λ, которая теперь называется функцией Планка. Такова сила термодинамики — все теории,

возникшие в XX в., не изменили этой формулы. Среди них и специальная теория относительности, которая утверждает постоянство скорости света, и независимость интервала между событиями в пространстве-времени, и квантовая механика, которую я специально не пускал пока на страницы этой книги, чтобы продемонстрировать удивительную мощь термодинамики.

Почему Вселенная называется горячей?

История ядерной физики и астрофизики, и просто история XX в. удивительным и неслучайным образом накрепко переплелись. Вернёмся в конец 40-х годов прошлого века. Идёт холодная война. Два человека — два ядерщика — работают над атомным оружием. Один в США, а другой — в СССР. И тот, и другой могли встретиться в 20-е годы в Ленинграде. Но не случилось, потому что Георгий Гамов эмигрировал, покинув свою Джаз-банду. Вспоминается знаменитое советское — «кто сегодня любит Джаз, завтра родину продаст!». Но Гамов фактически спасся. В 30-е годы его друзья попали в переплёт: Димуса (Дмитрия Дмитриевича Иваненко) осудили и отправили в лагеря, Лев Давидович Ландау был просто спасен Капицей, а вот Аббат — Бронштейн — был расстрелян, как и многие в Пулковской астрономической обсерватории. Конечно репрессии, конечно Сталин, но вот, пожив 20 лет в Интернете, понимаешь, сколь же многочисленны доносчики и анонимщики в этом мире.

Вторым героем этой главы станет Яков Борисович Зельдович — человек, который ещё до Второй мировой войны построил теорию цепных ядерных ре-

акций (совместно с другом — физиком Харитоном), а в конце 40-х стал заведующим лабораторией под замечательным названием «Теория атомной бомбы» Курчатовского атомного проекта в старинном русском городе Сарове.

Оба, работая над атомным проектами стран соперников и даже врагов по холодной войне, конечно, находили время, чтобы подумать о вечном, т. е. о законах мироздания, о Вселенной. В 1953 г. Георгий Гамов первым догадался, что в расширяющейся Вселенной, предсказанной Фридманом и открытой Хабблом, наряду с обычным веществом, сосредоточенным в основном в звёздах и галактиках, должно быть ещё никем не открытое, призрачное микроволновое излучение. Оно подобно бесконечному океану заполняет все уголки Вселенной. И именно оно делает Вселенную горячей!

Действительно, давайте применим закон Стефана—Больцмана к небольшому шарику однородной и изотропной Вселенной, заполненному излучением. Легко видеть, что плотность энергии шара будет изменяться обратно пропорционально четвертой степени его радиуса: $u \sim U/V \sim 1/R^4$. Но согласно закону Стефана—Больцмана плотность энергии излучения пропорциональна четвертой степени температуры $u \sim T^4$. Отсюда получаем, что в ходе расширения Вселенной температура равновесного излучения изменялась обратно пропорционально её радиусу $T \sim 1/R$. Если уйти в прошлое, то оказывается, что раньше температура Вселенной была намного больше, чем сейчас, и даже бесконечной в начале. Световой газ, заполняющий Вселенную, если он действительно существует в ней в настоящее время, разогрел бы вещество до такой степени, что оно превратилось бы в горячую плазму.

Однако в 1963 г. советский физик Зельдович обратил внимание на то, что наблюдаемое расширение Вселенной вовсе не означает, что в прошлом она была горячей. Например, атомная бомба перед взрывом вовсе не должна быть горячей — её можно потрогать руками! Кому как не Зельдовичу — одному из создателей русского атомного оружия — этого не знать! И придумал он холодную модель Вселенной. Но что это значит «холодная», «горячая»? «Ну вот! — скажет читатель, — опять кухонные термины». То у вас печка, то что-то там томится, а теперь холодная — горячая. Ну и что! Кухня дело важное. На кухнях много бывало интересных разговоров в XX в. ... Яков Борисович Зельдович был лет на 10 моложе участников Джазбанды и попал в физическую среду Ленинграда, когда его оппонент уже эмигрировал в Америку. Проработав вначале под руководством академика Семёнова, получившего Нобелевскую премию по химии за разработку теории химических цепных реакций, Зельдович в 1938 г., совместно со своим старшим товарищем Юлием Харитоном, применил эту теорию к цепным ядерным реакциям. Именно поэтому Курчатов позже привлёк Зельдовича к атомному проекту. В начале 60-х годов Зельдович, наконец, получил возможность снова работать в науке открыто и с неописуемой энергией и страстью создал советскую школу релятивистской астрофизики. Так вот, в своей работе 1963 г. Зельдович, полемизируя с Гамовым, отметил, что закон Хаббла всего лишь говорит о том, что в прошлом плотность Вселенной была больше, но ничего не говорит о температуре Вселенной. Расширение означает лишь одно — Вселенная раньше была более плотной. Поэтому, возможно, в прошлом Вселенная

была не только очень плотной, но и холодной! Что это значит в физическом смысле? Дело в том, что во Вселенной имеется огромное количество сверхплотных сгустков вещества (называемых белыми карликами и нейтронными звёздами). При этом они настолько холодные, что могут находиться в кристаллическом состоянии. Вот и ответ. Можно взять твёрдое вещество, например, металл, накалить его и превратить в жидкость, а подогрев ещё — и в газ, да и в плазму. Значит, кусок металла может быть холодным — кристаллическим, или горячим — в жидком или газообразном состоянии. Значит и Вселенная могла быть вначале и холодной кристаллической или горячей газообразной. Но мы знаем, что в горячей печке рождается чёрнотельное излучение. Следовательно, если Вселенная горячая, то она должна быть заполнена равновесным однородным, изотропным чёрнотельным излучением. Конечно, в ходе расширения Вселенной оно будет остывать по закону обратного размера Вселенной $T \sim 1/R$ и постепенно из жёсткого коротковолнового излучения превращаться в мягкое длинноволновое, а точнее радиоволновое с максимумом в миллиметровом диапазоне. И чтобы выбрать между двумя вариантами Зельдовича и Гамова требовалось открыть или закрыть остатки этого горячего состояния в виде «реликтового» (термин придумал советский астрофизик Иосиф Шкловский) излучения.

Но как можно определить температуру Вселенной? Где этот градусник и куда его вставить? Георгий Гамов придумал его! И, пожалуй, это стало его вторым из трёх великих открытий. К тому времени уже стало ясно (благодаря стахановским наблюдениям Слайфера и других астрономов), что современная Вселенная

состоит на 70 % из водорода и 25 % гелия. То, что наша Вселенная водородная — неудивительно. Ведь водород — самый простой атом Вселенной — состоит из протона и электрона. Неудивительно, что господь Бог создавал сначала простое, а потом сложное. Но удивительно другое — откуда взялся гелий в нашей Вселенной, да ещё в таком огромном количестве — четверть! Но ведь Гамов был величайшим «алхимиком» XX в. Ведь именно он первый придумал цепную реакцию превращения водорода в гелий в звёздах. И он понимал, что, сколько бы звёзды ни тужились, им в жизни не хватило бы силёнок превратить четверть всего наличного водорода в гелий. Но ведь гелий мог быть создан самой Вселенной. Ведь Вселенная могла быть раньше настолько горячей, что в ней могли идти термоядерные реакции горения водорода с превращением в гелий. Но для этого надо было предположить, что Вселенная была раньше горячей!

Георгий Гамов прикинул, какой должна быть современная температура равновесного излучения. Для этого он воспользовался оценками плотности Вселенной и её химическим составом и рассчитал, при какой температуре Вселенной в ней успеет «нагореть» из первичного водорода нужное количество гелия. У Гамова получилось, что температура излучения должна быть порядка 10 К. Это очень холодный газ, скажет читатель и будет прав. При такой температуре свет уже не свет, а микроволновое излучение! Значит, предположил Я. Б. Зельдович, для окончательного установления истины, нужно провести эксперимент: попытаться обнаружить реликтовое излучение.

И вот наступает 1965 г. Зельдович, наверное, даже не предполагал, как быстро падёт его модель. А, мо-

жет, и предполагал. В это же время два члена его команды — Андрей Дорошкевич и Игорь Новиков — проверяют, можно ли современными методами зарегистрировать реликтовое излучение, и доказывают что да, это слабое излучение в микроволновом диапазоне можно обнаружить радиоастрономическими методами, т. е. с помощью радиотелескопа! Более того, на семинар к Зельдовичу из Ленинграда приезжают радиофизики, которые утверждают, что они давно уже обнаружили это излучение! Публикация об этом эпохальном открытии появляется в специальном радиофизическом журнале на русском языке, но её, к сожалению, никто не замечает[24]. Может и не хочет замечать. Как бы там ни было, но в 1965 г. радиоинженеры Роберт Уилсон и Арно Пензиас, не имевшие понятия о горячей Вселенной, сообщают об открытии универсального чёрнотельного излучения, позже названного Иосифом Шкловским, — реликтовым. Они установили, что куда бы не смотрел ради-

[24] В 1955 г. аспирант-радиоастроном Тигран Арамович Шмаонов в Пулковской обсерватории под руководством известных советских радиоастрономов С. Э. Хайкина и Н. Л. Кайдановского провёл измерения радиоизлучения из космоса на длине волны 32 см и экспериментально обнаружил шумовое СВЧ излучение. Вывод из этих измерений был таков: «Оказалось, что абсолютная величина эффективной температуры радиоизлучения фона… равна 4 ± 3 К». Шмаонов отмечал независимость интенсивности излучения от направления на небе и от времени. После защиты диссертации он опубликовал об этом статью в неастрономическом журнале «Приборы и техника эксперимента». Кстати, американский астроном Мак-Келлар ещё в 40-е годы обнаружил то же излучение совершенно другим способом. Об этом мы ещё расскажем на страницах этой книги. Жаль, что Гамов не прочёл эти работы, тем более первая из них была написана на его родном русском языке.

отелескоп (не в Землю, конечно), ото всюду приходило излучение с температурой 2,7 К! Великолепное согласие с теорией Гамова! Почему Гамов не получил Нобелевскую премию — непонятно. А ведь это только один из трёх великих результатов Гамова. Ну да и Нобелевская премия, вещь в себе, есть там великие результаты, а есть и посредственные, и есть много «нелауреатов» величайшего калибра от Льва Толстого до Георгия Гамова.

В западной литературе до сих пор живёт термин микроволновое фоновое излучение Вселенной, но, конечно, никакого отношения к микроволновой печи Вселенная не имеет.

Вот мы все время говорим неоднородность, однородность. Но это не какие-то отвлечённые метафизические свойства излучения. Каждый, кто разогревал пищу в микроволновой печи, знает, что часто наряду с обжигающими кусками пищи, попадаются холодные, как из холодильника. Это результат неоднородности распределения энергии внутри микроволновой печи. Дело в том, что излучение в микроволновой печи так же далеко от равновесия, как и вкус расстегайчиков, испечённых в русской печи, от вкуса полуобгоревших тостов, которыми сотрудники утоляют голод долгими вечерами, задерживаясь в лабораториях. В отличие от чёрнотельного излучения, которое абсолютно однородно и изотропно, излучение в микроволновой печи не имеет того цветового (спектрального) разнообразия, а ещё и очень неоднородно. Чтобы как-то бороться с неоднородностью, тарелку с пиццей вращают в узлах и пучностях стоячих электромагнитных волн. А потом эту пиццу едят. *Уффф*!

Красное смещение или сколько времени на вашем термометре?

Итак, температура реликтового излучения изменяется с расширением Вселенной обратно пропорционально её радиусу R : $T \sim 1/R$. Если вы мысленно будете бегать по Вселенной с градусником, то, чем дальше вы забредёте в прошлое, тем выше будут показания вашего градусника. Но можно ли измерить температуру Вселенной, никуда не бегая? Можно.

Давайте посмотрим, что происходит с длиной волны электромагнитных волн при таком расширении. Ещё в 90-х годах XIX в. немецкий физик Вильгельм Вин, экспериментируя с чёрнотельным излучением, обнаружил, что чем больше температура чёрного тела, тем меньше длина волны, на которой находится максимум энергии излучения (Нобелевская премия по физике, 1911 г.). Фактически мы, опираясь на этот закон, можем утверждать, что для расширяющейся Вселенной длины волн света растут пропорционально размеру Вселенной: $\lambda \sim R$. Сделаем последний шаг и найдём одну из удивительных формул Вселенной. Она никак не связана ни с плотностью Вселенной, ни даже с её судьбой. Она — результат термодинамики. Вспомним, как мы определяли красное смещение: $\lambda = \lambda_0(1+z)$, следовательно, температура Вселенной изменяется по закону $T = T_0(1+z)$.

Эта замечательная коротенькая формула просто говорит о том, что чем дальше мы заглядываем вглубь Вселенной, тем более горячей мы её видим, причём справедлив вот такой простой закон.

Самая далёкая галактика, которую мы обнаружили в настоящее время во Вселенной, имеет красное сме-

щение **~9**. Это значит, что температура излучения реликтового излучения там, в прошлом, в 10 раз больше чем сейчас, т. е. равна 27 К.

Итак, почему же она горячая? Фактически это вопрос о состоянии вещества 13 млрд лет назад. Если бы Вселенная была жидкой или твёрдой в далеком прошлом, как предполагал Зельдович, можно было бы сказать, что Вселенная холодная. Но в том-то всё и дело, что температура реликтового излучения оказалась слишком высокой. Смотрите, средняя плотность обычного вещества во Вселенной — это несколько атомов в 10-ти литровом ведре межгалактического пространства. Давайте мысленно переместим этот объём в прошлое, например, в то время, когда температура реликтового излучения была достаточна для того, чтобы ионизовать вещество Вселенной. Обычно атомы водорода, а именно из водорода в основном состоит вещество Вселенной, ионизованы при температуре в несколько тысяч градусов. Конечно, конкретное значение зависит от плотности газа. Например, при красном смещении, равном 1000, объём нашего ведра уменьшится в миллиард раз и плотность составит 1 частица в кубическом сантиметре. При этом температура плазмы будет около 2700 К. Такого вещества полно в нашей Галактике сейчас, и все оно газообразное и более того ионизованное. Да, плазма — не камень. Вселенная действительно оказалась горячей!

Фотосфера Вселенной

Какие они — звёзды? Просто поднимите голову (ведь астрономы это люди, с задранными кверху го-

ловами[25]) и посмотрите на Солнце. Как в детстве. Сначала вы увидите голубой круг, который потом превратится в чёрный диск. Но Солнце не чёрное! Солнце слишком яркое, и наши светочувствительные элементы глаз (у фотоаппаратов это пиксели, а у нас колбочки и палочки) переполняются и перестают видеть. Поэтому, лучше взять что-нибудь закопчённое (*«Не леща, конечно»* — *Уффф*) а, например, стекло.

Вот тут уж все будет видно, как надо: Солнце — желтоватый яркий светящийся круглый дисплей! Точнее, некая светящаяся непрозрачная поверхность, чуть темнеющая к краю. Астрономы называют её фотосферой — некоторой непрозрачной поверхностью.

То, что мы видим вокруг себя, это фотосферы. Например, окружающие нас люди. С точки зрения теории переноса излучения — это фотосферы. Конечно, человек мало похож на сферу. Но в принципе мы видим то, что позволяет увидеть видимое излучение.

А ведь Солнце и звёзды — это не люди, это на самом деле раскалённые газовые шары. Но газа в них так много, что мы видим лишь самую внешнюю кромку, а сам скелет мы не видим! Все скрыто как в тумане, только в очень горячем! Температура Солнечной фотосферы порядка 6000 градусов (неважно каких![26]). Солнце, как и Вселенная, горячее! А вот, например, кора любого радиопульсара — нейтронной звёзды —

---

[25] Обратное, как говорят математики, вообще говоря, неверно.

[26] Во Вселенной есть такие большие величины, что совершенно неважно в каких единицах они измеряются!

имеет температуру в сотни тысяч градусов, т. е. холодная. Потому что твёрдая.

Дотошный читатель может ядовито усмехнуться и сказать, что температура Вселенной в 1000 раз меньше! Но это сейчас, когда Вселенная расширилась и остыла. Кстати она расширилась настолько, что стала совершенно прозрачна для реликтового излучения. Поэтому сейчас реликтовое излучение практически никак не связано с веществом. А это было так не всегда. Именно в тот момент, когда наша Вселенная была в 1000 раз меньше, она ещё была непрозрачной для фотонов и температура её была в тысячу раз выше, т. е. почти такой же, как и у Солнца. Именно в те давние времена Вселенная была непрозрачной, и реликтовое излучение было намертво связано с веществом и полностью определяло его температуру. Легко прикинуть возраст Вселенной в тот момент. Для этого можно воспользоваться законом Кеплера, в котором куб радиуса любого шарика пропорционален квадрату возраста Вселенной. Очевидно, что возраст Вселенной, когда она была в 1000 раз меньше, в 30 000 раз меньше современного. Делим 10 млрд лет на 30 000, получаем возраст Вселенной — 300 000 лет. Другими словами, через 300 000 лет после Большого взрыва атомы в основном водородной плазмы стали нейтральными и наступило, говоря восточным языком, «просветление» Вселенной.

Теперь понятно, что «увидели» советские радиофизики и Нобелевские лауреаты Пензиас и Уилсон — это фактически удаленная от нас на 10 млрд лет непрозрачная поверхность — фотосфера — с близкой к солнечной температурой!

Почему же ночное небо такое тёмное? — воскликнет словами немецкого физика Ольберса[27] удивлённый читатель. Потому, отвечает ему *Уффф*, что эта непрозрачная стена, разогретая до температуры Солнца, улетает от нас с огромной скоростью и в результате эффекта Доплера краснеет и «остывает» до 3 К. Таким образом, мы живём в гигантской горячей пещере, стенки которой удаляются с огромной скоростью и делают её свечение невидимым. Правда пещера эта необычная, потому что любой другой наблюдатель Вселенной увидит её фотосферу точно такой же, как и земляне — с температурой 3 К.

Эта великая горячая стена света, удаляясь со сверхсветовой скоростью (ничего страшного, ведь это воображаемая поверхность), испускает реликтовое излучение, которое заполняет всю видимую Вселенную равномерно. Астрофизики-радиоастрономы многих стран в течение практически 25 лет после открытия реликтового излучения безуспешно пытались обнаружить хоть какие-то загогулины на нём. В СССР, на Северном Кавказе, даже был поставлен радиотелескоп диаметром 600 метров — РАТАН 600, одной из задач которого было обнаружить хоть какие-то вариации реликтового излучения. Безуспешно. Так, к началу 80-х гг. прошлого века, было показано, что фоновое реликтовое излучение Вселенной выглажено с точностью до одной десятитысячной. Другими словами, астрономам не удалось найти несовершенство

[27] Генриху Ольберсу приписывается так называемый фотометрический парадокс. Дело в том, что в классической физике в бесконечной неподвижной однородно заполненной звёздами Вселенной ночное небо (как и дневное) было бы бесконечно ярким.

фонового излучения — оно оказалось излучением абсолютно чёрного тела.

Даже на Солнце есть пятна, а фотосфера нашей Вселенной абсолютно гладкая. Почему это так важно? Да потому, что вокруг нас полно объектов — планеты, звёзды, галактики и их скопления. Но очевидно, что никаких объектов в полностью однородной и изотропной Вселенной быть не может!?

Вначале было слово. И слово звучало тяжёлым басом

Впервые вопрос об образовании объектов в почти однородном мире был решён математически английским физиком Джинсом в 1929 г. В то время Джеймс Джинс интересовался природой происхождения не просто каких-то объектов, а конкретно звёзд. Надо сказать, Джинс не был первым человеком, который задался этим вопросом — ведь астрономия древнейшая из наук, а астрономы тысячелетиями смотрели на звёзды и иногда задумывались над их происхождением. Можно сказать, что вопрос этот долгие тысячелетия стоял в ряду так называемых проклятых вопросов (к некоторым, нерешённым, я обещаю обязательно обратиться в этой книге), что подтверждается хотя бы тем, что вербально теорию образования звёзд сформулировал философ Кант. Однако, философский подход не позволил теории Канта — Лапласа стать частью натуральной философии. В сущности, Джинс показал, что первоначально однородная, изотропная газовая среда неустойчива относительно небольших возмущений плотности и скорости. А помнит ли читатель, что такое малые возмущения плотности и скоро-

сти газа? Да, правильно — малые возмущения плотности и скорости есть звук! Стоит стукнуть по столу рукой — и во все стороны побегут звуковые волны, сжимая и разжимая маленькие объёмчики воздуха, пока эти уплотнения не ударят слушателям в ушную перепонку. Но как же, братцы, спросит тот же читатель, сколько я не стучал по столу, сколько я не кричал попусту, а ни одной звёзды вокруг меня не образовалось! Соглашусь, сам таков. От нашего слова никаких звёзд не образуется. Добавлю — пока. Всё дело в том, что частота порождающего звёзды звука должна быть настолько мала, т. е. голос должен быть настолько басовит, что этот звук просто не помещается на Земле — его длина волны намного больше не только Земли, но и всей Солнечной системы, и даже превышает расстояние до ближайших звёзд. Другое дело во Вселенной — там места много. Если нет ограничений земным тяготением, можно говорить любым даже инфразвуком, или ещё точнее тяжелым басом[28]. Но и это первым заметил Джинс, если возмущения будут такой большой длины, то уже нельзя пренебречь самогравитацией газа. Ведь газ, каким бы он ни был призрачным, имеет плотность и массу, а любая масса создает тяготение — спасибо Гуку с Ньютоном.

Фактически ситуация следующая: если выйти в огромное однородное газопылевое облако, как говорится, в широкую космическую степь и громко

[28] Здесь я пытаются процитировать, давно забытую песню, из великолепного фильма моего детства «Последний дюйм», снятого по одноименному рассказу американского писателя Джеймса Олдриджа. Первые строчки этой песни удивительным образом ложатся на теорию джинсовской неустойчивости: «Тяжелым басом гремит фугас, трещит земля как пустой орех....»

крикнуть тяжелым басом, то звук этот породит целую россыпь звёзд. Можно легко оценить длину волны тяжелого баса, способного превращаться в звёзды. Её теперь называют критической длиной волны Джинса.

Давайте возьмём один узелок тяжёлой волны размером R и заменим его шариком того же диаметра. Найдём его полную энергию и посмотрим, является ли объект гравитационно-связанным, как это мы делали выше с шариком однородной расширяющейся Вселенной. Энергия «самогравитирующего» газа складывается из потенциальной гравитационной энергии U и кинетической энергии Q случайных движений молекул газа, которая, по сути, и есть внутренняя энергия газа. Поскольку средняя скорость молекул примерно равна скорости звука в газе, то внутренняя энергия фактически равна $Q = Ma^2/2$:

$$E = U + Q = -GM^2/\lambda + Ma^2/2 < 0.$$

Найдём критическое значение λ, при котором полная энергия равна нулю, вспомнив, что масса облака пропорциональна плотности умноженной на объём λ^3. Это и будет критическая длина волны Джинса.

$$U \sim GM^2/\lambda \sim G\rho^2\lambda^5\,;\; Q \sim Ma_{зв}^{\,2}/2 \sim \rho\lambda^3 a_{зв}^{\,2}.$$

Сравнивая гравитационную энергию сжатия с внутренней энергией, мы видим, что они по-разному зависят от размера шарика, т. е. от λ (длины волны возмущения). Чем больше размер облака, тем больше роль гравитации (что естественно!) и при некотором критическом значении размера они сравниваются, так что все облака большего размера неизбежно сжимаются в звёзды. Эта критическая длина волны примерно равна:

$$\lambda_{\text{Джинса}} = (a_{\text{зв}}^2 / G\rho)^{1/2}.$$

Последняя формула с точностью до безразмерных констант порядка единицы полностью совпадает с точным результатом, полученным Джинсом при решении задачи о тяжёлом звуке. *Уффф*!

Выдохнув, посмотрим на формулу Джинса. Длина волны λ увеличивается при возрастании скорости звука. Напомним, что скорость звука — это скорость случайного движения молекул газа и, следовательно, она растёт с ростом температуры. Мораль — чем газ горячее, тем труднее из него сделать звезду. Ну и, конечно, очевидно из той же формулы, что звёзды должны образовываться не только в самых холодных, но и самых плотных областях галактик, что и наблюдается на снимках звёздного неба *(См. вклейку 10)*.

На рисунке показана Туманность Карина в созвездии Киля. Фотография сделана русским телескопом-роботом МАСТЕР, расположенным в ЮАР. Здесь 500 000 лет назад из газа и пыли родились голубые звёзды, раскрасившие мрачные пыльные закоулки разноцветными праздничными красками. Телескоп построен на средства Сергея Михайловича Бодрова — русского мецената начала XXI в.

Невольно вспомнишь библейское: «Вначале было слово…» И слово было сказано басом. («*Явно не по-женски…*» — *Уффф*.)

Ландау и Лифшиц тоже разные люди

Замечательная работа Джеймса Джинса положила начало теории образования звёзд. Конечно, остаётся очень много деталей, но главная идея работает.

Тяжёлый звук с длиной волны больше критической распадается на самогравитирующие объекты — протозвёздные облака, плотность которых растёт по экспоненте. Я. Б. Зельдович, рассказывая о работе Джинса, в конце лекции всегда ставил в тупик студентов и аспирантов вопросом: а где у Джинса допущена ошибка? Обычно в таких случаях наступала зыбкая гнетущая тишина, как будто все звёзды, включая ближайшую, должны были исчезнуть с небосвода от этой самой ошибки Джинса… Но, не давая случиться непоправимому, Зельдович сам объяснял: главная ошибка состояла в том, что первоначальное невозмущенное состояние газа абсолютно неподвижно. А ведь это невозможно! Ведь в такой однородной Вселенной есть только одна сила — сила притяжения, и газ не может быть неподвижным. Эту ошибку исправил советский физик Евгений Михайлович Лифшиц (знаменитый соавтор Ландау), решив задачу на фоне расширяющейся Вселенной, да и к тому с учётом общей теории относительности. Результат оказался неожиданным. Понятно, что на фоне разбегающейся Вселенной образовать объекты гораздо труднее, чем в статическом мире — ведь сначала тяготению нужно побороть разбегание, а уж потом давление газа! Однако, оказалось, что критическая длина волны, начиная с которой неоднородности начинают превращаться в объекты, точно совпадает с длиной волны Джинса! Правда, возмущения в расширяющейся Вселенной растут не по экспоненте, а по степенной функции $\sim t^{2/3}$. Но в любом случае всё начинается с начальных звуковых возмущений.

Кстати, этот результат Лифшица можно получить без решения сложных уравнений и высшей матема-

тики. Однажды на лекции по космологии Зельдович обронил такую фразу, что степенные законы роста возмущений следуют из простой задачи о самогравитирующих шариках. Через много лет, читая лекции по теоретической астрофизике, я вспомнил эту фразу и быстро нашёл одно из решений — но не растущее, т. е. не то решение, которое приводит к образованию объектов во Вселенной, а так называемое падающее решение. А вот растущее мне долго не давалось.

Итак, вырежем два шара радиусом ***R*** из полностью однородной и изотропной Вселенной. Мысленно конечно (рис. 12).

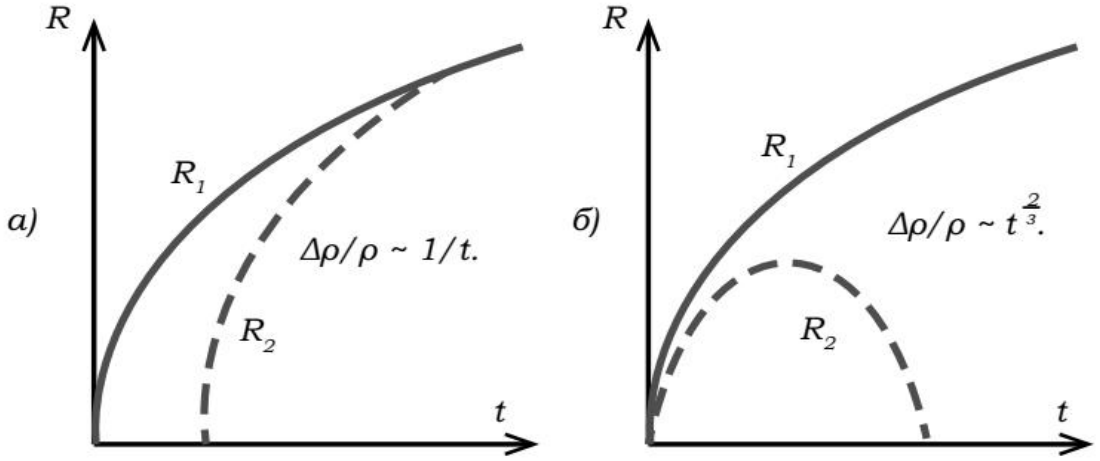


Рис.12

Напомню, что в однородной Вселенной это возможно, так как динамическая судьба шара повторяет судьбу Вселенной, а описывается в силу малости размера и массы обычной классической механикой Ньютона.

Пусть Вселенная расширяется со второй космической скоростью — как ракета, улетающая от Земли в межпланетное пространство. Мы знаем, что полная

энергия такого движения всегда равна нулю. И следовательно $E = K + U = 0$, при этом размер любого шара связан с временем расширения третьим законом Кеплера $R \sim t^{2/3}$. Отсюда, кстати, следует, что плотность Вселенной изменяется по закону $\rho \sim M/R^3 \sim 1/t^2$. Теперь слегка возмутим нашу однородную Вселенную. Её можно возмутить двумя способами (для спецов скажу, что это соответствует второму порядку дифференциальных уравнений, описывающих динамику шара). Можно, предположить, что один из шаров, пусть шар 2, слегка задумался на старте и начал расширяться чуть позже на время Δt. Следовательно, разность плотностей со временем будет равна:

$$\Delta\rho \sim t^{-2} - (t+\Delta t)^{-2} \sim 2t\,\Delta t / (t^2(t^2+2\,t\,\Delta t + \Delta t^2) \sim 1/t^3.$$

$\Delta\rho$ — величина размерная, и ничего нам не говорит о возмущении. Поэтому астрофизики делят возмущение на среднюю плотность Вселенной и называют эту величину контрастом плотности. Очевидно, контраст плотности убывает со временем: $\Delta\rho/\rho \sim 1/t$. Как видим, второй шар по мере расширения стремится стать похожим на всю Вселенную и происходит это в соответствии с затухающим решением Лифшица. Фальстарт можно не наказывать! Хочется выдохнуть — *Уффф*! Но не выдыхается, потому что мы приступаем к более сложной задаче. Мы попытаемся, как говорят физики, показать на пальцах, что и расширяющаяся Вселенная гравитационно-неустойчива и в ней могут образовываться галактики и скопления галактик. При этом контраст плотности будет нарастать в расширяющейся Вселенной по закону $t^{2/3}$.

Во-первых, давайте вспомним и то, что радиус шара растёт по третьему закону Кеплера и, следо-

вательно, закон роста возмущений можно записать так: $\Delta\rho / \rho \sim R$. Итак («*Показывая пустые руки зрителям*» — *Уффф*), пусть оба шара «стартанули» из своего туманного прошлого без фальстарта, одновременно. Но, по каким-то причинам, в том далёком прошлом, один из шаров пнули чуть слабее, и он полетел со слегка отрицательной полной энергией. («*Такой далеко не улетит*!» — *Уффф*.) Читатель уже понимает, что в силу однородности окружающего мира наш возмущенный шар это не почувствует. Вся остальная однородная Вселенная не может изменить его судьбу. Раз у него энергия стала немного отрицательной, он родился гравитационно-связанным и это неизлечимо — подобно камню, брошенному вверх, или камню, отпущенному с высоты пизанской башни, или ракете которой не хватило мощности — наш шар **2** упадёт обратно. Т. е. такая Вселенная гравитационно-неустойчива относительно вариаций начального импульса! Неустойчивость Джинса работает и в расширяющейся Вселенной. Но вот как найти конкретный закон роста. Это важно для нашей книги и для нашего прошлого и будущего.

Итак, пусть вся невозмущенная Вселенная расширяется со второй космической скоростью. Осторожно положим на поверхность любого невозмущенного шара пробное тело массой 1 г. Его полная энергия будет равна нулю: $\varepsilon_1 = v_1^2 / 2 - GM/R_1 = 0$. И, следовательно, кинетическая энергия в точности равна потенциальной:

$$v_1^2/2 = GM/R_1.$$

При этом плотность Вселенной: $\rho_1 \sim M/R_1^3$.

Давайте присмотримся к шару **2**, обладающему слегка отрицательной полной энергией. Так же осторожно положим на его поверхность пробное тело массой 1 г. Энергия пробного тела будет равна

$$\varepsilon_2 = v_2^2/2 - GM/R_2 < 0.$$

Теперь внимательно смотрите за руками, ведь мы получаем растущее решение Лифшица на пальцах!

Для второго шара:

$$v_2^2/2 = GM/R + \varepsilon_2,$$

где ε_2 — маленькая отрицательная величина с размерностью энергии, делённой на грамм.

$$\rho_2 \sim M/R^3 \sim (v_2^2/2R_2^2 - \varepsilon_2)/R^2.$$

Значит $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 \sim -\varepsilon_2/R_1^2$, и получаем закон роста возмущений в расширяющейся Вселенной:

$$\Delta\rho/\rho_1 \sim -\varepsilon_2/R_1^2/(1/R_1^3) \sim R_1 \sim t^{2/3}.$$

Уффф!

«Как же так?» — скажет математически настроенный читатель, без всяких уравнений, без уравнений общей теории относительности вдруг получили важнейший результат для нашей Вселенной. Ну не совсем так. На самом деле мы рассмотрели только один класс возмущений, называемый адиабатным. Что это значит? Это значит, что, слегка задерживая шарик, мы не меняем в нём количества теплоты. Но вот можно и менять это самое количество теплоты, тогда добавляются так называемые энтропийные вариации, да ещё если вспомнить общую теорию относительности, то надо рассматривать ещё и гравитационные волны, которые неизбежно будут возникать в неоднородной

Вселенной. Так, что мы получили лишь часть ответа, но самую важную!!! Ну, теперь понятно, как рождаются объекты во Вселенной. В такой Вселенной можно жить!

Вселенная и русские блины

Легко популяризировать научные открытия учёных, когда сами учёные придумывают такие образы, что их научные результаты становятся незабываемыми. Вспомните физиков 60-х гг., они умели не только шутить, но и украшать свою жизнь яркими почти литературными терминами: кварки, очарование, или, например, знаменитая многослойная — асимптотическая свобода. Мне же приходится часто придумывать странные, необычные аналогии, чтобы читатель не терял нити повествования и жил судьбой Вселенной неотрывно с автором.

Как мы уже только не называли Вселенную — и микроволновой печью, и термостатом, и поршнем, и наконец, русской печью, а вот теперь настала в ней пора кое-что испечь. И, слава Богу, здесь ничего не надо придумывать.

В 1970 г. советский физик Яков Борисович Зельдович опубликовал остроумную статью, в которой ввёл в обиход науки о Вселенной новый термин, ставший позже интернациональным — блины. А его теория теперь называется теорией блинов. Я же обещал кое-что написать и для домохозяек («*Нет, ты для школьников и академиков обещал*» — *Уффф*). Дело в том, что работа Джинса о гравитационной неустойчивости однородной самотяготеющей среды (1925 г.) и работа Лифшица, в которой он учёл эффекты об-

щей теории относительности и расширение Вселенной (1946 г.) — это всё линейные теории, в которых возмущения однородной Вселенной предполагаются небольшими: $\Delta\rho/\rho << 1$. Это важные решения. Они демонстрируют возможности и описывают характер самого начального этапа зарождения объектов в практически однородной Вселенной, которую слегка потрясли. Но эти теории ничего не говорят ни о форме образующихся тел, ни о процессах, происходящих на средних и поздних стадиях, когда контраст плотности становится сравнимым или даже больше 1. Как же так, скажет прозорливый читатель, в конце концов, образуются шары и, если есть какое-то вращение, то эллипсоиды. А уж про звёзды и планеты и говорить нечего — гляньте на Луну, она точно повторяет форму Солнца! Да, это все так. Сила гравитации радиальная, во всяком случае, в классической физике, которая здесь и важна. Поэтому, в конце концов, образуются шары. И потому кольцеобразное затмение Солнца является самой яркой демонстрацией универсальности характера гравитационного взаимодействия: на снимке ясно видно, что Луна и Земля — объекты в тысячу раз отличающиеся по размеру и удалённости — имеют одинаковую форму. Как сказали бы в древности: «имеют форму совершенную, приятную глазу». На вклейке 11 показана максимальная фаза кольцеобразного затмения в Токио 21 мая 2012 г. Как отметил однажды известнейший астрофизик Николай Иванович Шакура — один из моих учителей, — если посчитать с какой вероятностью должны были совпасть видимые диаметры Луны и Солнца при отличии их реальных размеров почти тысячу раз, то явление тонких кольцевых затмений кажется невероятным! Но зато благо-

даря такому совпадению хорошо видна всемирность всемирного тяготения.

Так вот, Зельдович показал, что не шар самый естественный объект, а плоское двумерное уплотнение, которое больше напоминает блины, а не футбольный мяч! По-крайней мере на определённой стадии! Более того, всемирное тяготение при этом вообще не причём! Не зря Зельдович, публикуя статьи, иногда пользовался псевдонимом П. Парадоксов. Именно парадоксы являются маяками научного плавания в страну добывания знаний.

Те, кто ездил на троллейбусах или трамваях, знают, что они часто сбиваясь с расписания, начинают «кучковаться» — ходят парами или тройками. Особенно запоминается это зимой, года холодный пронизывающий ветер со снежной пылью заметает и тебя, и остановку, весь город, и кажется всю Вселенную, а проклятый трамвай никак не показывается из ночной мглы. А когда, наконец, приходят два или три сразу, то вместо радости чувствуешь настоящее возмущение. Почему я беру именно трамваи и троллейбусы. Потому, что это идеальный одномерный транспорт. Даже трамваи лучше, потому, что они не могут в принципе обогнать друг друга. Хотя между ними нет никакой силы притяжения, но вот кучкуются и всё тут. Вы скажете, это просто вагоновожатые скучают друг без друга, вот и собираются караваном. Водители и вагоновожатые тут тоже не причём.

Представьте себе неуправляемые равномерно движущиеся из пункта *А* в пункт *Б* трамваи. Много трамваев. Если они все будут двигаться с одинаковой начальной скоростью, то они никогда не встретятся. Но не бывает ничего идеального. Если начальные

скорости чуть отличаются — то они неизбежно будут образовывать пробки. А теперь, говорит Зельдович, представьте себе, что у вас не трамваи, а частицы сплошной упругой среды наподобие той, что была во Вселенной в момент образования фотосферы. Газ, плазма — это сплошная среда, и если её чуть-чуть возмутить, то в ней возникнут не скачки плотности и скорости, а плавное изменение свойств среды. Возьмем одномерную Вселенную наподобие трамваев.

В 1970 г., я ещё учился на первом курсе МГУ, и тогда, ещё молодой ассистент МГУ Анатолий Засов — наш куратор, предложил нам с моим однокашником и товарищем Виктором Корниловым[29] забавную задачу. Надо было проверить, являются ли взаимодействующие галактики результатом случайного столкновения одиночных галактик, или так они и образовались. В общем, решать задачу будущий профессор Анатолий Засов предложил в лоб. Мы взяли каталог галактик до 15–16 звёздной величины, разлиновали в прямоугольной проекции небесные координаты и тупо на двух огромных листах ватмана начали строить карту галактического неба. Применялась тушь двух цветов — черная для обычных галактик и красная для взаимодействующих галактик из знаменитого каталога Бориса Александровича Воронцова-

[29] Виктор Геральдович Корнилов стал одним из лучших российских астрономов, возглавив Лабораторию Новых Фотометрических методов ГАИШ МГУ. Кстати, после первого курса наши пути в науке разошлись, но иногда мы собирались вместе. Сделали два очень не слабых научных проекта: создали первую в мире программу популяционного синтеза звёзд, основанную на методе Монте-Карло, а последние 15 лет мы два уже вполне немолодых человека создали с молодежью Глобальную Роботизированную сеть МАСТЕР.

Вельяминова — замечательного астронома (потомка рода Волконских и Пушкиных), написавшего великий учебник астрономии, по которому учились все советские десятиклассники. Мы нанесли на ватман около 15 000 галактик! Помню работа, начавшаяся ещё зимой после первых каникул, продолжалась несколько месяцев, и все это время вокруг нас вечерами ходили однокашники-первокурсники, отпуская ядовитые замечания, что, мол, вместо того, чтобы идти на дискотеку — они тут заняли весь обеденный стол и негде поужинать. На самом деле они ходили и по доброму с юношеским нетерпением завидовали нашему научному задору. А ведь в нашей группе это подействовало — почти все однокашники были распределены в МГУ — небывалый случай. Итак, карта была построена, но мы совершенно не осознавали, что за картина в результате развернулась на этих двух листах ватмана. Лишь через несколько лет я понял, что мы первыми увидели блины Зельдовича. Почему? Потому что вместо шаров и эллипсоидов галактическое небо было населено некими вытянутыми размытыми структурами. Лишь одно из скоплений напоминало шар — это огромное скопление в Волосах вероники, и о нём мы ещё поговорим.

Только через три года, в конце третьего курса, после успешной сдачи экзамена Зельдовичу по космологии, он пригласил меня в свою группу (тогда в Институт Прикладной Математики) для работы над проблемой блинов. Вот тогда я и познакомился с этой удивительной работой. Все до неё думали, что самая распространенная форма тел во Вселенной — это шар. Почему? Потому что закон тяготения Ньютона сферически симметричен — не содержит угловых

зависимостей, а только расстояние R между телами массами m и M:

$$F = GmM / R^2.$$

В принципе, это так и есть, но... Но вот первыми во Вселенной (во всяком случае, в очень больших масштабах) образуются вовсе не шары, а двумерные объекты, похожие на блины. Причём это универсальное свойство даже не связано с гравитацией.

Давайте рассуждать следующим образом. Представим, что наше пространство одномерно (как пространство трамваев и троллейбусов), а пространство-время, соответственно, двумерно. При этом в нашей Вселенной нет тяготения.

Чтобы в такой одномерной Вселенной возникли объекты, надо слегка потрясти её так, что бы физические точки приобрели начальную случайную скорость. Реальную Вселенную, конечно, никто не трясет, она сама трясется из-за квантовых флуктуаций.

Физические возмущения всегда плавные, т. е. в бесконечно малом объёме все частицы двигаются почти

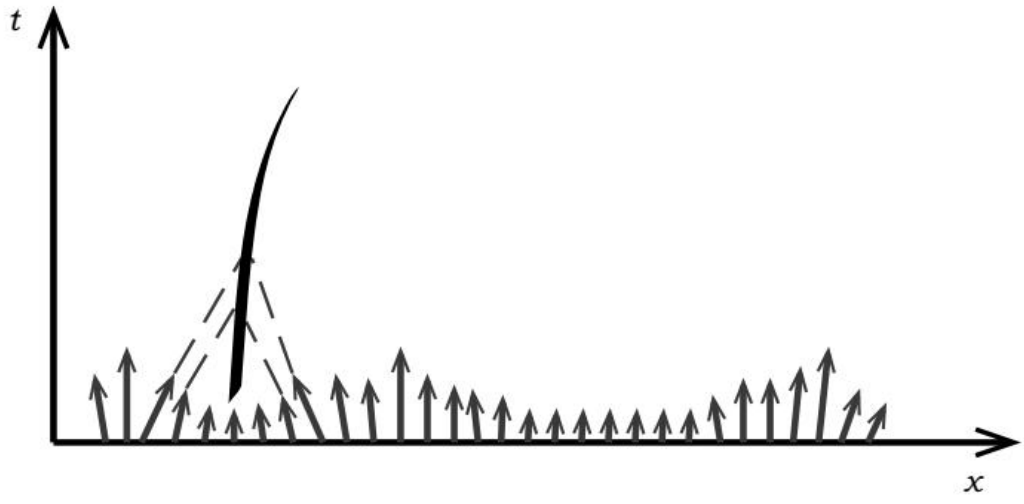


Рис.13. Одномерная Вселенная

параллельно. Но это «почти» приводит к тому, что рано или поздно возникнут столкновения между частицами и образуются сгустки плотности. Посмотрите на рисунок 13 для одномерной Вселенной, на котором показано пространство-время с начальными скоростями (стрелочки на оси *X*). Будущее идёт вверх.

Если бы стрелочки были все одинаковы (параллельны друг-другу), то никаких столкновений (ведь гравитации нет) не было бы, и объекты бы не образовывались. Но в нашей Вселенной стрелочки «возмущены», и постепенно частицы начинают сталкиваться. В пространстве-времени образуется линия, называемая каустикой, а в пространстве — точки растущей массы, т. е. у нас образуются одномерные объекты! На рисунке 13 показано образование каустик в одномерном пространстве. Так возникают пробки на дорогах, и по той же причине кучкуются троллейбусы.

В двумерном пространстве образуются линии, а в нашем трёхмерном — поверхности. Эти поверхности Зельдович назвал «блинами». Конечно, со временем, когда становится важной гравитация, блины скатываются и превращаются в шарообразные объекты. Так что не всегда первый блин комом. Но это «потом» ещё не наступило! Ведь нашей Вселенной всего-то тринадцать с половиной миллиардов лет! Эти блины астрономы прекрасно наблюдают в масштабах сотен миллионов световых лет.

Пресекаясь между собой, они создают так называемую сетчатую структуру Вселенной. Расчёт сетчатой структуры Вселенной — это отдельная очень большая вычислительная задача, которой было посвящено немало человеческого и компьютерного времени. Известен один из самых детальных расчётов

крупномасштабной структуры Вселенной — Bolshoy Computer Simulation[30], проделанный под руководством бывшего члена команды Зельдовича и моего однокашника — Анатолия Клыпина. В этом расчёте действительно на определенной стадии образуются блины, на пересечении которых и высвечивается сетка Вселенной. На вклейке 12 показана сетчатая структура Вселенной по результатам Слоановского обзора неба.

Теория блинов Зельдовича сыграла огромную роль в понимании одной из важнейших проблем космологии — формирование крупномасштабной структуры Вселенной. Компьютерные средства в 70-е гг. ещё не позволяли делать детальные расчёты образования структуры Вселенной. Причём речь тогда шла не о гидродинамических расчётах, а всего лишь о так называемой задаче ***N*** тел. Как известно из небесной механики, задача эта не имеет аналитического решения, и поэтому приближённое решение, предложенное Зельдовичем, было исключительно полезным. Его ученики и ученики его учеников, тем временем, начали первые расчёты, подхваченные конечно и на Западе, где компьютерные мощности существенно превосходили в то время советские. И вскоре численные расчёты подтвердили и качественно, и количественно, даже на нелинейной стадии, теорию блинов. Однако, ещё оставались вопросы и самый главный из них — это страшный дефицит времени жизни Вселенной. Кроме того на нелинейной стадии роста возмущений

[30] Здесь Анатолий Клыпин — один из руководителей проекта — обыгрывает название Большого театра — лучшего балетного театра мира (http://hipacc.ucsc.edu/Bolshoi/Collaborators.html).

уже нельзя было пренебрегать и давлением газа и самогравитацией блинов. Блины скорее уже напоминали оладушки.

Самая популярная научная формула

Альберт Эйнштейн первым написал формулу $E = mc^2$, а сэр Артур Эддингтон был первым популяризатором теории относительности. Конечно, Эддингтон стал знаменитым не благодаря популяризации этой формулы, а как автор одной из самых грозных идей XX в. — идеи извлекать энергию в термоядерных реакциях.

Как известно (*«Фраза больше подходит для справочника по физике и химии» — Уфф*), гелий примерно в четыре раза тяжелее водорода и следовательно, для его изготовления нужно как минимум четыре ядра атома водорода — протона. Но самое поразительное, и в этом и состоит главная идея сэра Артура Эддингтона — что, собрав вместе 4 протона, мы не только получим гелий, но ещё и дополнительную энергию. Все дело в самой знаменитой формуле Эйнштейна $E = mc^2$. Её знают все — от домохозяек до академиков. Популярность этой формулы подтверждается фотографией, приведённой на вклейке 13. Как-то по дороге в Сиракузы, в глухой деревушке острова Сицилия, я встретил кафе с названием mc^2. Не зря Архимед живал в Сицилии...

А давайте её выведем. Для этого поищем нашего велосипедиста Петю, он недавно проехал город Петра Ильича Чайковского — Клин — и направляется прямёхонько в Тверь. Слева и справа проплывают озера Иваньковского водохранилища, и рыбацкое сердце

Пети заныло — эх взять бы моторку, да и махнуть на Волгу, на ямы, на леща. Но Петя всего лишь герой нашей книги, да и вечереет уже, поэтому сейчас мы привлечём его к выводу самой знаменитой формулы Эйнштейна.

Представим себе две системы отсчёта — первая прямо связана с Петей, а вторая как раз на обочине его дороги, крепко стоящая на земле тверской — лабораторная система отсчёта. Едет себе, едет Петя и вдруг достает из карманов два фонарика и выпускает два фотона по направлению движения и против своего движения. Это он так предупреждает о себе водителей встречного и попутного транспорта.

Пусть масса Пети (включая массу фонариков) M, а его полная энергия E. Сила трения качения равна нулю.

В системе, связанной с велосипедистом Петей — два фотона улетают, а Петя как стоял на одном месте, так и стоит. Следовательно, его импульс не изменяется.

В системе отсчёта, связанной с дорогой в Тверской области, Петя движется со скоростью v, а скорость фотонов согласно принципу Эйнштейна всегда равна скорости света. Но из-за эффекта Доплера — Физо фотон, летящий от нас, — краснеет и теряет энергию, а фотон, пущенный по движению, наоборот, увеличивает энергию. Следовательно, импульсы, уносимые первым и вторым фотонами не одинаковы и, импульс велосипедиста Пети должен измениться. Но импульс любого тела равен произведению его массы на скорость:

$$p = Mv.$$

Но импульс не может измениться за счёт скорости, иначе системы отсчёта перестанут быть инерциаль-

ными (т. е. покоящимися или двигающимися равномерно). Значит должна измениться масса Пети! Итак, постоянство скорости света неизбежно приводит к тому, что масса тела перестает быть величиной постоянной в разных системах отсчёта!

Обозначим энергии фотонов E_1 и E_2 в лабораторной системе отсчёта $E_1 = hv_0 (1+ v/c)$, $E_2 = hv_0 (1 - v/c)$. Как видим $E_1 + E_2 = 2hv_0$ и, следовательно, изменение энергии Пети равно $2hv_0$, ведь именно фотоны унесли Петину энергию. А изменение импульса Пети равно разности импульсов фотонов. Импульс фотонов впервые измерил ещё один Петя — Пётр Николаевич Лебедев. Ведь давление света напрямую связано с изменением импульса фотонов. Оказалось, что импульс фотона просто равен его энергии, делённой на скорость света. По закону сохранения импульсов это изменение равно разности импульсов фотонов:

$$v \Delta M = p_2 - p_1 = E_1 / c - E_2 / c = 2 hv_0 v/ c^2 = v\Delta E/c^2.$$

Сокращая v, получаем: $\Delta E = c^2 \Delta M$, и (*Гремят фанфары, вступают литавры, туш!*):

$$E = Mc^2.$$

Уффф!!!!

Ну что же, пусть Петя едет дальше, а фонарики ему ещё пригодятся, потому как темнеет.

А мы отныне, будем смело говорить об энергии в терминах массы, и, наоборот, о массе в терминах энергии — ведь они связаны друг с другом всего лишь постоянным множителем равным квадрату самой фундаментальной величины нашей Вселенной — скорости света.

Апория велосипедиста Пети и пьяная Вселенная

Можно подсчитать, что в каждом кубическом сантиметре Вселенной находится 400 фотонов реликтового излучения. Представляете, существование скольких частиц-фотонов во Вселенной предсказал Георгий Гамов?!

Сравните, например, с количеством барионов: 1 штука в ведре. Общее число фотонов превосходит число барионов в 100 млн раз. Тем не менее, эти фотоны сейчас никак не влияют на динамику расширения Вселенной. Энергия каждого фотона очень мала и если её разделить на очень большое число c^2 (10^{21} в системе СГС), то масса всех фотонов получится пренебрежимо малой. В результате получается, что Вселенная разлетается по закону Кеплера. Но так было не всегда.

В ранней Вселенной закон Кеплера нарушался. Это было связано с тем, что реликтовое излучение в прошлом доминировало и полностью контролировало закон её расширения. Эта эпоха в жизни Вселенной называется радиационно-доминированной. Конец этой эпохи можно определить, приравняв плотность фотонов к плотности обычного вещества.

«Как это плотность фотонов, в г/см^3? Ведь масса фотона равна 0», — скажет начитанный академик!

Да масса покоя фотонов равна нулю, но фотон никогда не покоится, и по формуле Эйнштейна у него есть и масса.[31] Давайте опять последим за маленьким шариком. Плотность энергии излучения подчиняется закону

[31] Правда, просто так массу фотонов нельзя ставить, например, в закон всемирного тяготения. В общей теории относительности он для релятивистских частиц выглядит по-другому.

Стефана — Больцмана $u = aT^4$, а температура изменяется по закону $T \sim 1/R \sim T_0(1 + z)$. Соответственно, массовая плотность излучения фотонов $\rho_{изл} = u/c^2 = \rho_{изл.\ сегодня}\ (1 + z)^4$. Плотность материи обратно пропорциональна объёму, т. е. «растёт в прошлое» медленнее: $\rho_м = \rho_{м.\ сегодня}\ (1 + z)^3$. Приравнивая обе плотности, получаем красное смещение в момент окончания радиационно-доминированной эпохи, при котором плотность материи равна плотности излучения:

$$z_{рд} \approx (1 + z_{рд}) = \rho_{м.\ сегодня}\ /\ \rho_{изл.\ сегодня} \approx 30\ 000\ \Omega_м,$$

где $\Omega_м$ — безразмерная плотность материи Вселенной сегодня.

Вот такой «паровоз». Друзья, не рекомендую повторять эти вычисления в уме. Принимая $\Omega_м = 0{,}3$, получим кругленькую цифру, $z_{рд} = 10\ 000$.

Можно прикинуть время окончания владычества фотонов, используя третий закон Кеплера:

$$t/t_0 = (R/R_0)^{3/2} = 1/(1+z_{рд})^{3/2}.$$

Получаем, что Вселенная в этот момент была в миллион раз моложе и её возраст составлял порядка десяти тысяч лет. Не так уж далеко до момента просветления Вселенной, который наступил через 300 000 лет после начала Большого Взрыва.

По какому закону Вселенная расширялась в радиационно-доминированную эпоху? Ведь во Вселенной заполненной энергией и массой законы Кеплера уже не работают!

Пусть скорость расширения Вселенной по-прежнему равна второй космической скорости:

$$v^2/2 = GM/R.$$

Правда теперь масса M шарика меняется! Число фотонов сохраняется, а энергия каждого падает. Фотоны краснеют! Итак, масса фотонов:

$$M \sim uR^3/c^2 \sim R^{-4}R^3 \sim 1/R\,.$$

Подставляя эту зависимость в уравнение для второй космической скорости, получаем: $v \sim 1/R$! Представим себе велосипедиста Петю, который едет со скоростью обратно пропорциональной пройденному пути («*Ну-ну, апория Пети*» — *Уффф*). В единицу времени он проходит расстояние v, и это расстояние уменьшается в **2** раза после прохождения пути, равного R. Потом, пройдя расстояние равное $2R$, скорость упадёт в **4** раза. И т. д. Это значит, что после прохождения очередного удвоенного отрезка, он тратит на прохождения равных отрезков учетверённое время. Т. е. формула движения Пети будет $t \sim R^2$. Значит, Вселенная на радиационно-доминированной стадии будет расширяться по закону $R \sim \sqrt{t}$. (*Уффф*!)

Это уже не закон Кеплера, а закон движения сильно подвыпившего человека, блуждающего в лесу. Он пытается идти прямолинейно, но стукнувшись головой о дерево, вдруг забывает, куда он двигался раньше и идёт в случайном направлении — это броуновское движение. Говоря математическим языком, гауссовский процесс. Кажется, что человек никогда не выберется из этого леса. Эйнштейн показал, что в этом случае удаление человека от начальной точки постепенно увеличивается пропорционально корню квадратному из времени — точно как радиационно-доминированная Вселенная. Совпадение? Нет! Смотрите — радиационно-доминированная эпоха была раньше эпохи просветления (рекомбинации), т. е. на этой стадии фотоны двигались,

подобно пьяному человеку, постоянно поглощаясь и излучаясь по закону броуновского движения! Но чтобы во Вселенной не образовывались пустоты и не нарушалось термодинамическое равновесие, Вселенная должна расширяться по тому же закону! («*Браво!*» — *Уффф.*)

Алхимия Вселенной

В начале 20-х гг. прошлого века английский астрофизик Артур Эддингтон выдвинул сумасшедшую гипотезу о происхождении звёздной энергии. Он предположил, что энергия звёзд возникает «алхимически» при превращении одного химического элемента в другой, а именно — водорода в гелий. Как же так физика, и вдруг алхимия! Нет, теория относительности! Ведь сэр Артур Эддингтон был автором первой популярной книги по специальной теории относительности. Давайте возьмём из таблицы Менделеева вес атома гелия, вычтем массу четырех атомов водорода и получим $\Delta M = M_{He} - 4\ M_{H} = 1{,}4$ **Мэв**. Атом гелия примерно на одну тысячную легче четырёх протонов, из которых он состоит. Эта величина называется дефектом массы. Четыре протона, собравшись в компанию стали легче! Разделив полученное значение дефекта массы на массу четырёх протонов, получаем, что при образовании гелия из водорода согласно формуле Эйнштейна выделяется 0,4 % полной энергии вступивших в реакцию частиц. Это называется КПД — коэффициент полезного действия реакции горения (термоядерного!) водорода. Однако реакция эта, конечно, называется не алхимической, а термоядерной. Откуда берётся излишек энергии или куда девается масса при объединении

четырех атомов водорода? Энергия берётся из потенциальной энергии ядерной силы притяжения, действующей между протонами. Вы же не удивляетесь, откуда берётся электрическая энергия в вашем ноутбуке — из потенциальной энергии воды в поле гравитации Земли.

Но почему же я назвал идею Эддингтона сумасшедшей? Да, я просто повторил возражения современников Эддингтона, которые именно так и охарактеризовали его идею. Но к звёздам мы вернёмся позже, мы ещё не создали ни одного объекта во Вселенной.

Все как-то у нас наоборот получается. Вот была химия Вселенной, а почему теперь алхимия? Ведь историки науки обычно пишут, что сначала была алхимия, а потом, когда люди поумнели, из нее вылупилась химия. Так же утверждается, что сначала появилась астрология, а потом — астрономия. Сначала знахари, потом врачи и т. д. Но что-то тут не складывается. Астрономия появилась, и астрономы появились, но и астрологи не пропали. Мало того, что в России астрономию — главную мировоззренческую науку о мире, в котором мы живём — выкинули на два десятилетия за ненадобностью из школьной программы, так астрологи прописались на телевидении, там, где лет 30 назад властвовал знаменитый популяризатор науки — Сергей Петрович Капица с его великолепной передачей о науке и учёных «Очевидное — невероятное». Правда, алхимики не так часто появляются на экране, но они не совсем исчезли. Например, известный биржевой спекулянт (в хорошем смысле этого слова) и меценат Джордж Сорос написал книгу о современной экономике под названием «Алхимия финансов», почитав которую вполне понимаешь, что

экономисты и финансисты — особенно наши, из высших школ — это настоящие алхимики, и с экранов телевидения их не скоро попросят.

Но вернемся к алхимикам древности. Они пилили краеугольный камень преткновения, и пытались из свинца добыть золото. Если первое они иногда делали с успехом, то вот с золотом не получалось никак. Сейчас мы понимаем, что при комнатной температуре ядерные реакции не идут (холодный «термояд» так и остался в области ошибок, шумов и спекуляций). Но Вселенная, слава Богу, у нас горячая!

Так что давайте по порядку. Попытаемся для начала превратить водород в гелий. Почему водород? Взглянем на таблицу Менделеева. С увеличением атомного номера растёт вес и усложняется строение ядер атомов. Да потому что водород — это химический элемент номер 1 — самый лёгкий, он состоит из одного протона и одного электрона. Ну, электрон в массу большого вклада не дает — он в 1828 раз легче протона. Когда возраст Вселенной был менее 1 с, вся она состояла из протонов и электронов — кирпичиков, из которых состоит атом водорода. Превращение лёгких ядер в тяжёлые называют нуклеосинтезом или термоядерными реакциями.

Из-за большой температуры Вселенной в прошлом, все электроны так быстро двигались, что постоянно улетали от своего родного протона. Водородная плазма была полностью ионизована. Молодая Вселенная в химическом смысле была очень проста — она состояла полностью из водорода. Но свободные протоны могли бы сталкиваться и образовывать более тяжелые химические элементы. А следующим более тяжелым элементом является гелий.

При очень больших температурах (~10 МэВ) ядра нового элемента будут нестабильны. Ведь сила ядерного притяжения сравнима с кинетической энергией частиц и фотонов в космологической плазме того периода, и ударяясь друг о друга, ядра будут раскалываться как орехи. Чтобы образующийся гелий не распадался, нужны температуры пониже. Но тут ещё одна загвоздка, ядро гелия состоит из 4-х нуклонов — двух протонов и двух нейтронов. Значит, для образования гелия обязательно нужны нейтроны. Но нейтрон тяжелее протона и в свободном состоянии за 13 мин распадается на протон, электрон и нейтрино. Это так называемая реакция **β**-распада:

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e.$$

Но если нейтрон тяжелее протона, то откуда же взять нейтроны в космологической плазме? Образование нейтронов энергетически невыгодно. Дополнительная масса и, следовательно, энергия берётся из внутренней энергии космологической плазмы, и становится возможной обратная реакция **β**-захвата:

$$p^+ + e^- \rightarrow n^0 + \nu.$$

Пока температура Вселенной превышает разность энергий покоя нейтрона и протона:

$$(3/2)kT = mv^2/2 > (m_n - m_p)c^2 = 1{,}4 \text{ МэВ},$$

постоянно идёт реакция **β**-захвата в космологической плазме. Равновесные нейтроны объединяются в альфа-частицы вместе с протонами — происходит реакция нуклеосинтеза.

В обеих реакциях присутствует нейтрино (или антинейтрино). Эта частица — переносчик («*Ну и сло-*

вечко, прямиком из вирусологии», — *Уфф*) слабого взаимодействия в природе. Она была предсказана замечательным физиком XX в. Вольфгангом Паули в начале 30-х гг., когда экспериментаторы изучали в лабораторных условиях реакцию **β**-распада и обнаружили нарушение закона сохранения энергии. Вот тогда Паули предположил, что во время этой реакции нейтрон распадается не только на протон и электрон, как думали экспериментаторы, но и частицу очень слабовзаимодействующую и почти «невидимую».

Давайте примерно прикинем, когда во Вселенной была эпоха нуклеосинтеза. В разделе «Красное смещение или сколько времени на вашем термометре?» мы показали, что температура во Вселенной изменяется по закону обратного радиуса Вселенной, т. е. что $T \sim 1/R$. Итак ищем момент, когда температура Вселенной была больше 1,4 МэВ (примерно 1,4 млрд градусов). Для этого воспользуемся переводом градусов в электрон-вольты (**1 эВ = 10 000 К**).

$$R_{\text{нуклеосинтеза}} / R_0 = T_0 / T_{\text{нуклеосинтеза}} =$$

$$= 2{,}7\ \text{К} / 1{,}4\ \text{МэВ} = 2 \cdot 10^{-10},$$

т. е. в те далёкие «алхимические» времена Вселенная была в 5 млрд раз меньше. Если мы возведём в куб 5 млрд раз и умножим на современную плотность вещества — то получим плотность вещества в тот момент времени:

$$\rho_{\text{нуклеосинтеза}} \sim \rho_0 (R_0 / R_{\text{нуклеосинтеза}})^3 =$$

$$= \rho_0 (5 \cdot 10^9)^3 \approx 10^{-29}\ \text{г/см}^3 \cdot 10^{29} \approx 1\ \text{г/см}^3!$$

Плотность Вселенной была равна плотности воды! Ну, для большего эффекта мы положили современную плотность равной критической плотности $\rho_{крит} = 3H_0^2/8\pi G \approx 10^{-29}$ г/см^3. Но в 60-е гг. плотность барионного вещества Вселенной оценивалась гораздо ниже. И эпоха нуклеосинтеза длилась первые 3 мин после Большого Взрыва.

В эти первые три минуты нашего мира нейтроны искали протоны, образуя сначала дейтерий **D** — изотоп водорода (он способен соединяться с кислородом и в наше время именно этот дейтерий образует тяжёлую воду). Так же захват дейтерия **D** другим дейтерием приводил к образованию трития **T** — радиоактивному изотопу водорода (он образует с атомом кислорода сверхтяжёлую воду):

$$n + p \rightarrow D + \gamma;$$

$$D + D \rightarrow T + p.$$

Но два ядра дейтерия могут объединиться и, выбросив лишний нейтрон, образовать изотоп гелия ^{3}He: $D + D \rightarrow {}^3He + n$, а вот собственно гелий получается когда тритий и дейтерий объединяются, отбросив лишний нейтрон:

$$T + D \rightarrow {}^4He + n.$$

Эти все реакции идут в обе стороны — с образованием и разрушением тяжёлых ядер и изотопов. Ведь в термодинамическом равновесии все процессы взаимно компенсируются. Но, к окончанию 3-х минутного возраста равновесие во Вселенной слегка нарушается. Причина этого состоит в том, что в реакциях нуклеосинтеза участвует слабое взаимодействие (нейтрино). Оно притормаживает скорость реакций и делает её

сравнимой со скоростью расширения Вселенной. Это означает, что «поршень выдвигается слишком быстро» и равновесие нарушается. Образуется избыток свободных нейтронов, которые успевают объединиться с протонами и дать изотопы водорода и новый химический элемент природы — гелий.

Дальше образование новых элементов крайне подавлено. Во-первых, Вселенная расширяется, температура и плотность падают и времени на «поиски друг друга» у ядер не хватает. Гелий мог бы захватить еще один протон, но элемента с атомным весом 5 нет, а следующий после гелия — литий (^{7}Li) , но у него 7 нуклонов в ядре — его образуется очень мало (одна миллионная часть всего наличного материала). В принципе, если бы Вселенная представляла собой идеальный термостат, то легкие элементы вообще не образовались бы. Но из-за слабого взаимодействия и объединения водорода в дейтерий, тритий, гелий и немного в бериллий и литий, происходит нарушение равновесия — часть энергии выделяется при объединении вещества. Вследствие этого и остаются лишние нейтроны, необходимые для объединения тяжелых ядер.

Вот так в эпоху нуклеосинтеза во Вселенной образовался почти весь гелий и немного легких элементов и изотопов, которые в сумме составляют примерно 25 % .

Именно этот факт и использовал Георгий Гамов, чтобы предсказать существование реликтового излучения.

Вот только элементов потяжелее космологический нуклеосинтез не мог создать. Откуда же железо в антоновских яблоках? Об антоновских яблоках поговорим позже... в третьей главе.

Вселенная как бочка мёда

Итак, подведём итоги. Что за Вселенную мы получили к началу 80-х гг. прошлого века? Хочу подчеркнуть, что речь идёт о так называемой стандартной модели — т. е. о некоторой, сопутствующей текущему времени, парадигме, которая была признана большинством ведущих в данной области специалистов. Давайте посмотрим, как выглядела наша Вселенная, её иногда называли Вселенной Фридмана — Уокера (последний — американский физик, который повторил лишь часть результатов Фридмана через 10 лет после Фридмана). Присутствие здесь Александра Александровича Фридмана — старшего друга Джазбанды — это результат борьбы Я. Б. Зельдовича за несомненный существенный вклад Фридмана в развитие науки космологии. Но надо сразу сказать, что Фридман в холодном голодном Петербурге 20-го г., построил настолько широкую модель мира, что модель, описанная нами, является лишь частным случаем его общего решения.

Благодаря подвигу астронома-наблюдателя Слайфера и прозорливости Хаббла учёное сообщество узнало, что Вселенная расширяется и это означало, что она возникла когда-то в результате особого, важнейшего и самого мощного за всю её историю взрыва — Большого Взрыва, как выразился английский астрофизик Фред Хойл. На самом деле Фред Хойл не был согласен с теорией Большого Взрыва. Просто, будучи большим учёным и талантливым писателем, он подарил этот хлёсткий термин человечеству XX в. на своем опыте познавшим многочисленные взрывы двух самых жёстких за всю историю человечества мировых войн.

Согласно этой теории, примерно 10 млрд лет назад в чём-то доисторическом, возможно даже в пустом пространстве-времени, а быть может и вне пространства и вне времени в результате взрыва возникала Вселенная. К счастью, она оказалась горячей и заполненной излучением.

При этом она расширялась по закону квадратного корня из апории велосипедиста Пети: $R \sim \sqrt{t}$.

Через несколько минут после её рождения температура была настолько высока, что в ней пошла реакция нуклеосинтеза — превращения водорода в гелий и в некоторые легкие изотопы. В ходе расширения самые лёгкие ядерные дровишки прогорели. Вселенная поостыла, и в ней прекратились реакции, а четверть её вещества стала гелием. Никаких тяжелых элементов типа железа в ней не было и в помине. Современная плотность этого вещества была определена астрономами по светящимся объектам Вселенной и оказалась примерно в 20 раз меньше критической плотности Вселенной, т. е. составляла 5 % от критической плотности, соответствующей второй космической скорости расширения:

$$\rho_{крит} = 3H_0^2/8\pi G \sim 10^{-30}\ г/см^3.$$

Здесь H_0 принято равной современному значению **70 (км/с)/Мпс**, что соответствует обратной постоянной Хаббла $1/H_0$ = **14 млрд лет.**

Через 10 тыс. лет при красном смещении $z \approx 10\,000$ окончилась радиационно-доминированная эпоха.

Через 300 000 лет температура упала до температуры поверхности Солнца и плазма протонов и электронов начала превращаться в нейтральный газ. В этот момент Вселенная просветлела, и излучение перестало влиять на судьбу вещества — расширение

Вселенной стало напоминать движение ракеты, запущенной со скоростью близкой ко второй космической. Излучение же охлаждалось в соответствии с выведенной нами формулой $T \sim 1/R$, пока в 1965 г. не упала до 3 К и её не обнаружили радиофизики как реликтовый тлеющий «огарок» горячей Вселенной. Радиус любого выделенного шарика во Вселенной изменялся по закону Кеплера $R \sim t^{2/3}$. А плотность, соответственно, падала по обратному квадратичному закону:

$$\rho = 3H_0^2/4\pi G t^2.$$

Однако в этом бульоне были неоднородности. Встречались шарики поплотнее и вот именно из-за них, как показал впервые Евгений Лифшиц, сработала неустойчивость Джинса по закону:

$$\Delta\rho/\rho \sim t^{2/3} \sim R \sim 1/(1+z).$$

Примерно через миллиард лет в основном образовались звёзды, галактики и их скопления. Вокруг звёзд оформились планеты, на некоторых возникла жизнь, и мы сидим теперь среди этой замечательной природы и наслаждаемся построенной нами теорией Вселенной. Исследуем звёздные миры, пишем статьи, защищаем диссертации. Живи и радуйся!

Картина, казалась настолько ясной и логичной, что известный советский астрофизик Иосиф Шкловский в начале 80-х гг. даже написал статью под названием «Конец революции в астрономии».

Четыре ложки дёгтя

Но некоторым дотошным исследователям эта картина не очень нравилась. Были к этому сценарию образо-

вания нашего мира несколько вопросов, которые не давали спокойно спать отдельным диссидентам от науки.

Дело в том, что знания не только медленно становятся достоянием народа, но и учёной массы или, как говорят, научного «комьюнити» — учёных современников, свято верящих в стандартную модель. Лишь некоторые изгои, опережая время, продолжают ставить проклятые вопросы и стараться искать на них ответы. Как правило, эти люди и потом, когда становятся ясными их сомнения, остаются изгоями, присутствие которых в научном обществе в основном раздражает.

И так, что же это за ложки дегтя в нашей огромной бочке мёда под названием Вселенная «Фридмана»?

Парадокс № 1. Нас в этой Вселенной не должно быть!

Наше существование полностью несовместимо с изотропией Вселенной.

После открытия реликтового излучения двадцать пять лет радиоастрономы всего мира пытались найти хоть какие-то загогулины («*Учёные говорят — флуктуации, — а тебе нужно ельцинское словечко, популист!*» — *Уффф*!) в реликтовом излучении. Зачем? Смотрите, наблюдая реликтовое излучение, мы видим фотосферу Вселенной, удаленную от нас на расстояние с красным смещением $z \sim 1000$ (возраст Вселенной 300 000 лет). А при $z \sim 1$ (возраст Вселенной 1 млрд лет) мы уже видим звёзды и галактики, и их скопления. За это время согласно формуле растяжения $R = R_0(1+z)$ Вселенная увеличилась в тысячу и один раз! Причём контраст плотности стал порядка единицы: $\Delta\rho/\rho \sim 1$. На самом деле уже мно-

го больше единицы и намного раньше — мы видим самые далёкие объекты — гамма-всплески и галактики — на расстоянии $z \sim 10$. Максимум же звёздообразования приходится на красные смещения $z \sim 2$—3. Но по теории Лифшица возмущения растут прямо пропорционально радиусу Вселенной, т. е. могли вырасти к моменту бурного звёздообразования только в **~300** раз. Значит на большой горячей фотосфере, на этой великой стене Вселенной должны быть пятна с контрастом **~1/250,** т. е. в 0,4 %! Флуктуации температуры по закону Стефана — Больцмана должны были составлять четверть этой величины, т. е. $\Delta T/T \sim 10^{-3}$. В то время на крупнейшем в мире советском радиотелескопе **РАТАН 600**, расположенном вблизи станицы Зеленчукская (Северный Кавказ), наши радиоастрономы, во главе с Юрием Парийским, искали флуктуации реликтового фона и ничего подобного не находили. Фотосфера Вселенной казалась гладкой как колено с точностью на порядок выше! Так откуда же во Вселенной взялись скопления галактик, галактики, звёзды и, наконец, мы? Нас тут не должно быть!

Парадокс № 2. Космологический парадокс близнецов.

Говорят, у каждого человека есть двойник — некто очень похожий на нас. Ну не знаю. На красной площади я часто видел двойников Ленина, Сталина Горбачева... Скажу, не очень-то они похожи на своих героев. Но бывают однояйцовые близнецы — те действительно похожи. А вот разные части Вселенной абсолютно одинаковые и при этом они никогда не общались друг с другом!

Как-то в году 2003 на Общемосковском Семинаре Астрофизиков (ОСА) имени Якова Борисовича Зельдовича выступал тогда ещё будущий Нобелевский лауреат Виталий Лазаревич Гинзбург — один из трёх создателей знаменитого московского семинара. Речь шла, как всегда о наиболее важных, по мнению Виталия Лазаревича, проблемах современной физики. После доклада я задал вопрос о так называемой проблеме горизонта — причинной несвязанности «фридмановской» Вселенной и добавил, что ещё в школе читал его популярную книжку, в которой подчеркивалось это противоречие общепринятой тогда космологической модели. Если мысленно обратить расширение Вселенной вспять, то любой её объём начинает разбиваться на мелкие причинно-несвязанные друг с другом области. Виталий Лазаревич посмотрел на меня с искренним удивлением: «Я не помню такого!» Вообще это обычное дело, когда люди, активно работающие, забывают свои научные идеи.

Смотрите, любая новость в этом мире распространяется со скоростью меньше или равной скорости света. Следовательно, через время $\boldsymbol{t}$ о новости узнают только те, кто находится внутри сферы радиусом $\boldsymbol{R_{гор.} = ct}$ или меньше. То же происходит и во Вселенной. Если возраст Вселенной $\boldsymbol{t}$, то о новости знает только часть Вселенной с размером не больше радиуса причинно-связанной области $\boldsymbol{R_{гор.} = ct}$ вокруг данного события. На рисунке 14 показана одномерная модель статической Вселенной, которая возникла в момент $t = 0$. Рассмотрим два события B и C в некоторый момент времени $t > 0$. Чтобы установить причинную связанность этих событий, необходимо мысленно отправить в прошлое из каждой точ-

ки два световых сигнала в разные концы Вселенной. На пространственно-временной диаграмме возникнут два треугольника, основания которых никак не пересекаются. Поскольку скорость распространения информации не может быть больше скорости света, это означает, что события *B* и *C* не могут быть причинно связанными. В точке *A* события *B* и *C* узнают о друг друге. Кажется, что в расширяющейся Вселенной наши рассуждения уже будут ошибочны, — ведь в расширяющемся мире Вселенная была меньше, и события могли быть связанными. Но во Вселенной, которую мы построили в этой главе, это не так. Сравним размер причинно-связанной области с радиусом Вселенной, который изменяется по закону Кеплера $R \sim t^{2/3}$:

$$R_{\text{причин.}} / R \sim t / t^{2/3} \sim t^{1/3}.$$

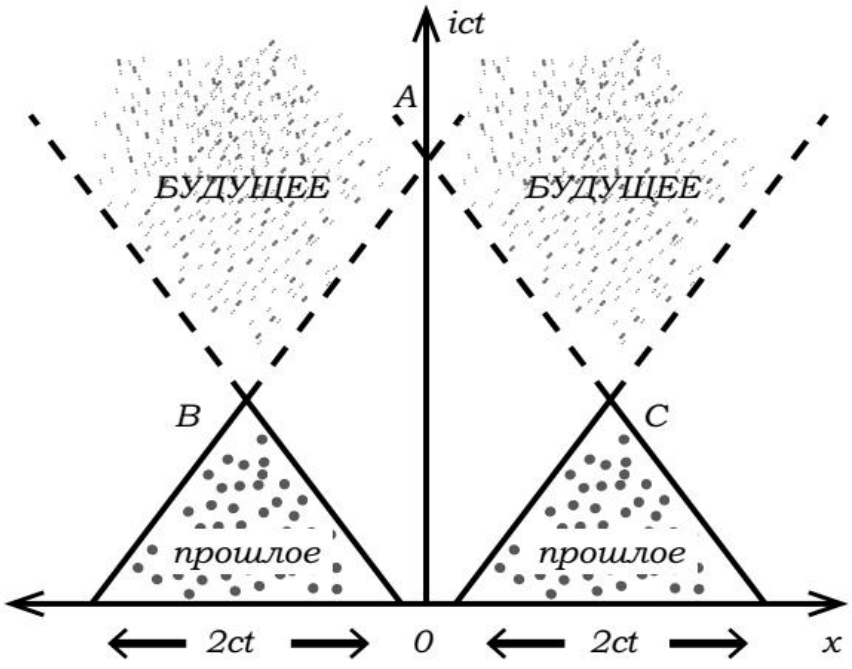


Рис. 14. Одномерная Вселенная

Если устремить время в прошлое, $t \to 0$, то мы увидим, что информированные части Вселенной уменьшаются быстрее, чем размер Вселенной, информация по такой молодой Вселенной вообще не успевает распространяться, — Вселенная расширяется быстрее скорости света! («*Ты даже ленишься объяснить, почему это не противоречит теории относительности! Ну и правильно, пусть сами разбираются*» — *Уффф*). Этому надо удивляться, чтобы не путать локальную скорость вещества с координатной скоростью пространства-времени.

Но в очень ранней Вселенной её масса определялась эффективной массой фотонов. Закон расширения был другой и, может быть, Вселенная станет причинно-связанной при таком законе расширения из апории велосипедиста Пети? Нет, увы. В начале расширения Вселенной информационный горизонт становится ещё меньше, чем в кеплеровском случае:

$$R_{\text{инфо}} / R \sim t / \sqrt{t} \sim \sqrt{t} \to 0 \text{ при } t \to 0.$$

Парадокс не решается. Разные части фотосферы ничего не знают друг о друге, а выглядят подозрительно похожими.

Парадокс № 3. Проблема тонкой настройки.

Раньше, конечно не в древнем Риме, а лет 30 назад, в любом радиоприёмнике существовала ручка тонкой настройки. В принципе это было важное интерактивное устройство общения слушателя (пользователя) с электронным устройством. Многие до онемения пальцев подкручивали частоту, пытаясь с максимальной точностью подстроить частоту приема и услышать сквозь шорох и треск идеальное звучание

какой-нибудь запрещённой передачи. Теперь это называют тюнингом, и вместо радио настраивают параметры желаемого автомобиля.

Вселенная, которую тут мы с вами построили, обладала ещё одним непонятным свойством. По какой-то причине в прошлом её плотность с огромной точностью была равна критической, как будто её выстрелили со второй космической скоростью с точностью, необъяснимой случайным совпадением.

Двигаясь в прошлое, мы обнаруживаем, что все отличия от параболического движения исчезают. Что бы это почувствовать, давайте посмотрим, как изменялась в прошлом безразмерная плотность Вселенной $\Omega = \rho/\rho_{крит}$. Пусть в нашей Вселенной есть область, у которой плотность немного меньше, чем критическая. Тогда контраст плотности будет меняться по закону роста (в будущее) и падения (в прошлое) решения Лифшица:

$$\Delta\rho\ /\rho_{крит} = (\rho - \rho_{крит})\ /\ \rho_{крит} = (\Omega - 1) \sim R.$$

Поскольку в прошлое радиус уменьшается, то плотность в прошлом стремится к критической с ужасающей точностью. Например, в момент формирования фотосферы (момент рекомбинации) отличие было в одну тысячную, в алхимическую эпоху и того меньше — в одну миллиардную — 10^{-10}!

Кто же там вертел ручки? По какой заданной программе проходил этот идеальный полёт Вселенной? Ну а если предположить, что Вселенная когда-то имела планковский размер 10^{-33} см, то точность настройки необходима фантастическая: $\Omega \sim l_{пл}/(C/H_0) = 10^{-33}\ см/10^{28}\ см \sim 10^{-61}$! Так, что и этот факт не имеет объяснения в построенной нами Вселенной.

Парадокс № 4. Вселенная младше звёзд.

«Мы — дети Галактики», поётся в одной популярной песне эпохи позднего застоя. Галактики — дети Вселенной. Представьте себе семью, в которой родные дети старше своих родителей? Давайте подсчитаем возраст построенной нами Вселенной.

Если бы все галактики двигались равномерно после их образования, то возраст Вселенной просто был бы равен расстоянию между любой парой, делённому на скорость разлёта:

$$t = R/v = 1/H = 14 \text{ млрд лет.}$$

Но галактики притягиваются друг к другу, поэтому раньше их скорость разлёта была больше, и средняя скорость за все время получалась выше той, которую мы измеряем сейчас. Именно поэтому радиус Вселенной растёт по закону Кеплера $R \sim t^{2/3}$, а не по закону равномерного движения $R \sim t$. Возраст Вселенной, расширяющейся по закону Кеплера, очевидно («*Протестую!!!*» — кричит в ухо *Уффф*, но я не реагирую. «*Пусть сами придумают какую-нибудь апорию*») равен двум третям возраста равномерно расширяющейся Вселенной. Т. е. возраст в модели Фридмана оказывается равен двум третям обратной постоянной Хаббла.

$$t = 2/3\ (1/H) = 9{,}3 \text{ млрд лет}.$$

Ну, что скажет читатель, схвативший меня за руку — сам говорил, мол, в астрономии и десять раз не разница, а теперь из-за 30 % делает трагедию. Да делаю. Ведь числам числа — рознь. Потому, есть случаи, когда всё дело упирается в десятые доли. Могу сказать, что на решение этого парадокса была потрачена ни одна жизнь учёных в XX в.

Действительно, понадобились добрые сто лет развития теории внутреннего строения звёзд и их эволюции, что бы доказать, что в нашей Галактике есть звёзды старше 12 млрд лет!!! Вот и получился парадокс — дети старше родителей.

Начитанный читатель сразу вспомнит о парадоксе близнецов. О том, как один из них улетел к звёздам на ракете, а потом вернулся… и на тебе — стал младше брата на 20 лет. Но в том и дело что наша Вселенная никуда не улетала, а была тут с нами и из нас и состояла…

Однако многие космологи продолжали строить Вселенную, пока не грянули 80-е годы перестройки, и многие поняли, что дальше «так жить нельзя» («*Это кино уже никто не помнит*[32]» — *Уффф*). И явилась совсем другая Вселенная, мрачная, загадочная, я бы даже сказал скрытная простому физическому взгляду.

[32] Здесь я вспоминаю название фильма Станислава Говорухина, вышедшего в свет перед развалом СССР.

Глава II
Скрытая Вселенная

Кроме парадоксов, которые будут разрешены («*В каком смысле?*» — *Уффф*), в этой главе есть ещё странные настораживающие совпадения. Невероятные совпадения, как и парадоксы, двигают вперед человеческую мысль. Конечно, бывают и случайные совпадения — например, упавший с крыши дома камень на прохожего[33] — это знаменитый мысленный эксперимент философа Гегеля. С точки зрения современного естествознания — то, что камень упал как раз в то время, когда под ним проходил человек — это чистое совпадение, не приводящее ни к каким великим открытиям новых таинственных сущностей[34]. Или, например, совпадение, которое заметил один из самых известных в мире астрофизиков — Николай Шакура[35] — видимый диаметр Луны совпадает с видимым диаметром Солнца. Именно поэтому мы видим полные и кольцеобразные солнечные затмения. Какой здесь глубокий смысл? Нет, наверное, просто «карта так легла»... Но есть совпадения неожидан-

---

[33] Вообще-то Гегель использовал кирпич, но нам удобнее работать с камнями.

[34] Вот если бы на голову упал ананас с крыши, то это уже не случайность, а преднамеренное преступление, которое могла, например, совершить ворона. Они часто так поступают, поэтому ходите подальше от карнизов не только когда на улице капель.

[35] Российский астрофизик, построивший первые модели «дискообразных звёзд» (газовых дисков) вокруг черных дыр

ные, глубокие, тревожащие сознание натурфилософа. Вот, например, возьмём тот же камень Гегеля, и бросим его с Пизанской башни. Потом возьмём камень побольше — и бросим опять. Следуя Галилео Галилею (рис. 15), будем при этом следить за временем падения. Каких бы камней мы не брали, сколько раз бы мы их не бросали, все они упадут за одно и то же время! Это же невероятно! Попробуйте поднять стокилограммовый камень! Тяжело! Не по силам! Почему? Потому что тяжелый камень Земля притягивает сильнее, чем лёгкий. Поэтому когда мы таскали камни (хотя бы и мысленно) на верхнюю террасу башни мы точно знали почём фунт лиха. Тяжелый камень поднимать тяжелее, а лететь он должен быстрее! Нет. Камни падают одинаково! Не удивил? Перенесёмся на время из Пизы куда-нибудь в порт поблизости. Ближайший порт — это Ливорно (оттуда быстро можно уплыть на Сардинию или на остров Святой Елены — последнее пристанище Наполеона...). Но мы никуда не уплываем, а наоборот помогаем причалить судну. Вот вы (юнга, если школьник и матрос — если академик) спрыгнули на берег и пытаетесь набросить канат на причальный кнехт[36]. Каната не хватает и приходится подтягивать ваше суденышко. Если это шлюпка — всё происходит очень быстро. А вот если это шхуна — придётся поднатужиться. Ведь силы у вас не беспредельные, а ускорение, по второму закону Ньютона, обратно пропорционально массе ускоряемого тела. И шхуна ваша подтягивается очень медленно. Но почему камни ле-

[36] Кнехт — это такая тумба (обычно чугунная), на которую набрасывается канат с петлей. («*С современными интернет-поисковиками можно прослыть и мореходом*» — *Уфф*.)

тят одинаково? «Всё очень просто, 300 лет отвечали физики — случайное совпадение — масса, которая сопротивляется движению в Ливорно (её называют массой инерции), и масса камня, который притягивает Земля в Пизе (её называют гравитационной массой) случайно совпадают!» И лишь Альберт Эйнштейн, через 300 лет решил, что это совпадение не случайно и открыл общую теорию относительности, а совпадение теперь стало великим физическим принципом — принципом эквивалентности.

Итак, куда же я клоню («*Поосторожнее, вон Пизанскую башню почти уронил*» — *Уфф*)? Было одно совпадение в нашей Вселенной, на которое почти все космологи долго не обращали внимание. Все да, не все. Замечательный советский и российский астрофизик Игорь Дмитриевич Новиков часто подчёркивал, что плотность Вселенной подозрительно близка к критической плотности $\rho_{крит} = 3H_0^2/8\pi G \sim \sim 10^{-30}$ г/см^3, и, наверное, она точно ей равна!



Рис. 15 Путём Галилея, В. Липунов.

Астрофизики часто даже измеряли её не в граммах на кубический сантиметр, а в долях от критической плотности $\Omega = \rho/\rho_{крит}$. Например в конце 60-х гг. прошлого века

измерения средней плотности Вселенной по светящемуся веществу давали всего 3 % от критической: **Ω = 0,03**.

Как же это близко, возражали оппоненты и математически ухмылялись: в 30 раз меньше критической плотности и это близко?! Ну, конечно, близко. Давайте представим, с какой точностью нужно пульнуть Вселенную, чтобы она сегодня имела плотность, например, 1/30. Решение Лифшица показывает, что точность настройки при старте должна быть порядка 10^{-61}! Т. е. попасть в 1/30 так же сложно как в единицу Вселенной! Значит, существует какой-то важный закон, по которому полная плотность Вселенной обязана быть точно равной единице!

Я хочу подчеркнуть, что теорема Новикова — это не просто парадокс тонкой настройки. Это совсем другая, возможно более важная штука. Ведь если мы в этой главе найдём ещё что-нибудь во Вселенной, и её наблюдаемая плотность станет ещё ближе к единице (а это точно произойдёт), то факт сей потребует совсем иного разговора.

Все дело в том, что Игорь Дмитриевич Новиков, во-первых, закончил астрономическое отделение Московского Университета имени Михайло Ломоносова, где воспитывают учёных с глубоким пониманием и широким кругозором, а во-вторых, его первым учителем был космолог Абрам Леонидович Зельманов, который часто повторял: практически — я теоретик, а теоретически — практик. Он, обожавший трёхэтажные уравнения, всегда учил видеть за ними реальность. Ведь любой космолог напичкан моделями Вселенных. И одному Богу известно, сколько вариантов мира могла изобрести природа. Следовательно,

плотность не просто близка, а точно равна критической и для этого, настаивал Новиков, есть специальная причина!

И время стало работать на гипотезу Новикова. Во-первых, плотность — это масса всего вещества, делённая на объём. Но и масса вещества не исчерпывается только светящимся веществом — есть ещё вещество мало светящееся, холодное, а во-вторых, объём — это расстояние в кубе. А расстояния в больших объёмах измерялись с очень плохой точностью. Но что такое слабосветящееся вещество? Астрономы вам скажут, что это межзвёздный газ и пыль. Но, например, в нашей Галактике — Млечный Путь — газа и пыли в 10 раз меньше чем звёзд. А доля газа между галактиками не превосходит и половины. Ну хорошо, есть ещё очень холодные маленькие звёзды — коричневые карлики. Эти звёзды не намного больше самых крупных планет. Все эти объекты состоят из обычного вещества, масса которого сосредоточена в нейтронах и протонах. Эти частицы в физике называют барионами и, соответственно, плотность обычного вещества называют барионной. Итак, астрономы поскребли по сусекам, но так и не смогли поднять барионную плотность Вселенной выше 5 % от критической. И тут на помощь пришел один старый, открытый ещё в 30-е гг. прошлого века, странный факт.

Тёмное вещество — скрытая материя

Хорошо, если читатель читает книгу подряд — тогда и автору просто, он может сэкономить время, лишь слегка напомнив читателю пройденное, либо

наоборот обыграть один и тот же факт по-новому. А вдумчивый читатель потом всё вспомнит, и у нас с ним получатся общие воспоминания, так глядишь в конце книги взгрустнём о чём-нибудь нашем общем сокровенном («*Ну хватит заниматься самолюбованием! — Уффф, — Ты забросил совсем велосипедиста Петю. Он так и спит на своей мировой линии где-то в июле под Тверью, вблизи города Эммаус*»). Кстати, помните, Эммаус — это библейский город на пути к которому ученики Христа впервые повстречали Учителя после воскрешения.

Спит Петя под Эммаусом, а снится ему огромный рулон тёмной материи, изготовленный в славном городе Иваново[37]. На дворе 1937 г. и вдруг, откуда ни возьмись, навстречу ему идёт фриц. Да не фриц вообще, а Фриц Цвикки — швейцарский астроном с немецким именем. А ткачихой на местной фабрике работает Маша. Именно Маша и соткала ему этот рулон мрачного цвета. Маша понятно, ведь именно с ней Петя поссорился в начале книги, а вот что здесь, в Иваново, делает фриц? Да очень просто, ведь Петя студент МГУ — астроном — и на последней лекции по внегалактической астрономии профессор Анатолий Владимирович Засов как раз рассказывал ему про тёмную материю, существование которой впервые заподозрил Фриц Цвикки («*Ты специально это все придумал, потому что тебе некуда вставить этого несчастного велосипедиста*» — *Уффф.*). Так вот дорогой читатель, не обращай внимания

[37] Иваново — небольшой город Московской области, прославившийся в советские годы своим ткацким производством и невестами, которых было сильно больше женихов в виду специфики ткацкого производства.

на скобки. Наверное, ты помнишь, как мы в первой главе легко определили, что такое гравитационно-связанные системы. Это системы, у которых полная сумма кинетической и потенциальной энергии отрицательна:

$$K + U < 0.$$

Ведь если она распадется и все составляющие системы улетят на бесконечность, их потенциальная энергия превратится в 0. А это невозможно потому, что кинетическая энергия $K = mv^2/2 > 0$, она не может стать отрицательной (о чём опять лучше всех знает велосипедист Петя).

Например, Земля и Луна представляют собой гравитационно-связанную систему, и поэтом никуда друг от друга не разбегаются. Луна не удаляется от нас по Закону Хаббла, — вопреки тому, что пишут иногда журналисты, графоманы и некоторые популяризаторы науки. Наша Галактика — Млечный Путь — тоже не разбегается, и практически не изменилась в размере за последние 10 млрд лет. Даже наша соседка — галактика М31 в созвездии Андромеды, тоже не участвует в хаббловском расширении Вселенной! Как же так! — воскликнет возмущенный читатель, а как же капля воды, которая отражает судьбу всего океана! Как же эти маленькие пробные шары, расширяющиеся со второй космической скоростью? Да, братцы — эти шарики, эти капельки ведут себя как вся Большая Вселенная только в полностью однородном и изотропном мире. А как только появляются загогулины (помните шарик с отрицательной полной энергией в задаче Лифшица), начинают образовываться гравитационно-связанные системы. И появляются галактики и их скопления. *Уффф*!

В тридцатые годы прошлого века Фриц Цвикки[38] — один из самых ярких астрофизиков XX в. — занялся изучением самых дальних и самых больших объектов Вселенной 30-х гг. — скоплений галактик. Он использовал результаты наблюдений 18 дюймового телескопа системы Шмидта Паломарской обсерватории США в Калифорнии, куда он переехал из Швейцарии в 1925 г. В то время этот телескоп позволял увидеть объекты 16-ой звёздной величины. Фриц Цвикки выбрал скопление туманностей в созвездии Волосы Вероники (Coma). Вся его наиболее плотная часть полностью попадала в поле зрение 18-ти дюймового широкоугольника. Сотни галактик на одном снимке! Посмотрите на фотографию скопления, сделанную русским телескопом МАСТЕР, расположенным на Канарских островах, который имеет почти такой же диаметр *(См. Вклейку 14)*[39]. Большинство объектов на ней — это галактики.

Тысячи галактик в одном кадре! А ведь каждая из них состоит из десятков миллиардов звёзд! Короче, маленькая модель Вселенной на одном снимке. Отличная идея для изучения устройства Большой

---

[38] Фриц Цвикки совместно с Вальтером Бааде придумали название — нейтронные звёзды, и связали возникновение одной из них со вспышкой сверхновой 1054 г., породившей не только Крабовидную туманность, но и нейтронную звезду — радиопульсар, открытую через 34 года после её предсказания.

[39] Отметим, что, например, телескопы российской Глобальной сети МАСТЕР, имеющие близкий диаметр и поле зрения, дают возможность снимать объекты в 100 раз более слабые, т. е. предел — 21 звездная величина. Всё дело в применении более точной оптики и главное — в применении цифровых Пропорциональных Зарядовых Счётчиков — ПЗС матриц. Два вертикальных бокса правее и ниже центра — это блики от светофильтров МАСТЕРа.

Вселенной. И что получилось у Цвикки? Скопление галактик вовсе не напоминало Вселенную Хаббла! Во-первых, оно было круглое — имело центр, к которому возрастала плотность числа галактик. Во-вторых, оно никуда не разбегалось. Чтобы это доказать ему хватило только 18-ти дюймового (45 см) телескопа и никаких спектров! Цвикки применил остроумный метод — стал подсчитывать число галактик в концентрических кругах с центром в самой плотной части скопления. Он обнаружил, что плотность числа галактик падает от центра по так называемому изотермическому закону, т. е. по закону газа, состоящего из частиц, пришедших в определенное равновесие (будто их поставили в русскую печку — термостат).

Далее Цвикки начал подсчитывать кинетическую и гравитационную энергию скопления, и тут его поджидал парадокс! Суммарная кинетическая энергия галактик оказалась в сотни раз больше потенциально гравитационной энергии, связывающей скопления! Либо Цвикки ошибся в сто раз, либо он не учёл ещё какую-то скрытую от наших глаз массу вещества, связывающую своим тяготением всё скопление. Можно только представить, с каким трепетом он часами всматривался в черно-белые снимки скопления в надежде увидёть хоть что-то ещё, что могло бы связать этот пчелиный рой. Но нет, пчёлы оказались неправильными — они должны были бы давно разлететься, но не разлетались, объединяемые каким-то неведомым, таинственным, скрытым от света, тёмным покрывалом. Тёмная материя — воскликнули астрономы XX в. («*Лет через пятьдесят*!» — *Уффф*). А вы говорите, причём тут велосипедист Петя и его сон.

Почти полвека тёмная материя (Dark matter), или скрытая масса, находилась на ролях незаконно рождённого ребенка, дожидаясь своей доли наследства в виде процентного вклада от полной массы Вселенной. Вот вам и недостающие до критической плотности 95 % массы, необходимые Вселенной чтобы, сделать её плотность по Новикову в точности равной критической! Но об этом чуть позже.

Работает ли закон Кеплера в галактиках?

Бывают научные статьи правильные, интересные, прочтёшь их, и всё становится ясным, но что дальше делать — непонятно. А есть работы, читая которые купаешься в идеях, ворошишь мозгами и встаёт перед тобой целый ворох вопросов и задач. Такие «осеменяющие» работы очень важны в науке. Они не обязаны решать какую-то проблему, или скажем так, они не должны быть безупречны и безошибочны, но они должны открывать новые горизонты и пути исследования. К таким работам относится и статья Фрица Цвикки, опубликованная в американском астрофизическом журнале 1937 г. Фактически, в этой работе, Цвикки описал все возможные методы измерения масс удалённых сложных звёздных и галактических систем, вплоть до использования эффекта гравитационного микролинзирования, которые десятилетиями применялись и применяются до сих пор астрономами всего мира. В этой его работе вы не найдёте слово «скрытая» или «тёмная» материя. Но вы найдёте главное — новые парадоксы и новые идеи.

В частности, он предложил искать массу вещества по характеру вращения скоплений (неважно чего — звёзд или галактик). Именно этот метод стал одним из наиболее надежных доказательств существования скрытого вещества во Вселенной. А как вообще взвешивают звёзды и звёздные системы? Ведь не так, как раньше в палатах мер и весов взвешивали на весах с коромыслом, положат искомое тело на одну чашу, а на другую гирьки — стандарты типа тех, что из палаты весов и мер. Звёзды и Галактики не притащишь на Землю. Да и где найти подходящие гири? Слава Богу, природа сама создала такие подходящие гири и весы. Ведь, почти половина всех звёзд Вселенной имеет соседку, а иногда и несколько. Вот этих соседей и можно использовать в качестве гирек.

Например, в Солнечной системе, все планеты вращаются по закону Кеплера, в который входит масса Солнца. Правда, туда ещё входит и постоянная тяготения. Но её, к счастью, измерил в лаборатории физик Кавендиш ещё в XIX в., а потом уточнил Марат Усманович Сагитов в Московском Государственном университете имени М. В. Ломоносова. Планеты, как и спутники Земли, движутся с первой космической скоростью. При этом, двойная кинетическая энергия в точности равна гравитационной, взятой с обратным знаком: $2E + U = 0$. Напомним, что кинетическая энергия планет $mv^2/2$, а потенциальная $— GMm/R$, первая космическая скорость $v = \sqrt{GM/R}$. Отсюда получаем:

$$M = v^2 R/G.$$

Масса планеты выпала благодаря открытию Галилея на Пизанской башне!

Измерил скорость вращения v по эффекту Доплера, нашел расстояние R до центра системы — получил массу. Получил массу — думай, что с ней делать дальше. Например, приспособь её к массе Вселенной.

А давайте снимать спектры разных частей Галактик, и, измеряя по эффекту Доплера скорости вращения галактик, с помощью закона Кеплера определим массу Галактики. Так, прочитав статью Цвикки, подумали астрономы, и принялись за работу. Их вдохновляла простая логическая цепочка. Смотрите — скорость вращения Солнца вокруг центра галактики 200 км/с, т. е. примерно в 200/29 = 20/3 = 7 раз больше, чем скорость вращения Земли вокруг Солнца. Значит, если бы центр галактики находился на расстоянии Солнца, её масса должна была быть равна 50-ти солнечным массам. Но центр Галактики находится на расстоянии не 1 а. е., а на расстоянии 30 000 св. лет или ровно 10 000 пк! Парсек (пк) — это расстояние, с которого астрономическая единица (а. е.) видна под углом 1 угловая секунда или $1/(2 \cdot 10^5)$ радиан. Итак («*Дай Бог не сбиться со счёта*» — *Уфф*), центр Галактики находится в 2 млдрд раз дальше, чем Земля от Солнца. Следовательно, масса нашей Галактики равна примерно **2 · 50 = 100 млрд** солнечных масс! Кстати, очень близко к реальности («*Как говорит автор: с огромной астрономической точностью*» — *Уфф*)!

Но в действительности все не так просто, Галактика не совсем похожа на нашу солнечную систему. Первое, что сделали астрономы, это нанесли на график скорости вращения в зависимости от расстояния до центра систем (рис. 16). Назвали эти рисунки кривыми вращения галактик и начали их сравнивать с кривой вращения солнечной системы.

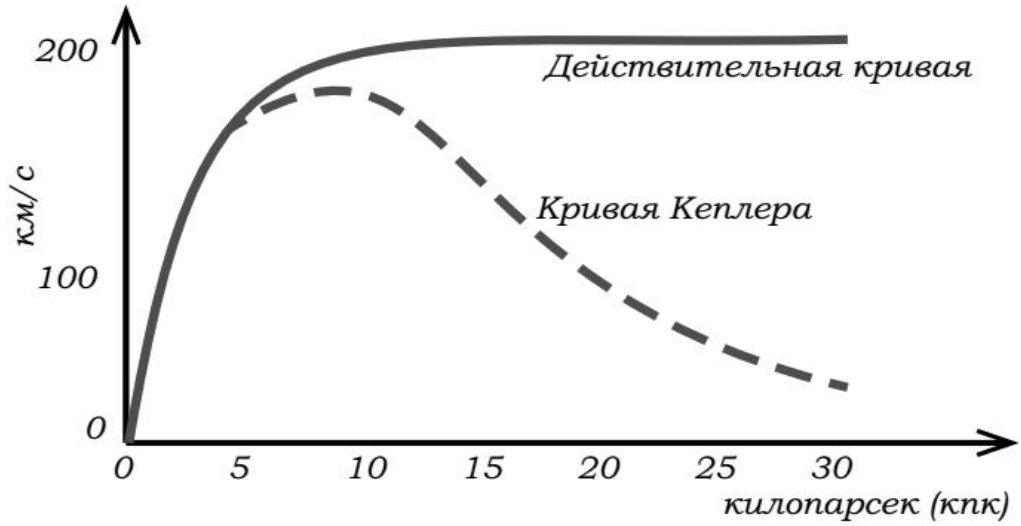


Рис.16. Одномерная Вселенная

Оказалось, что кривая вращения галактик совсем не похожа на кривую вращения планет солнечной системы.

Если применять закон Кеплера, то получается, что масса нашей Галактики зависит от того в каком месте мы измеряем её скорость, более того, вдали от центра, там где уже закончились звёзды, скорость не падает, а остаётся постоянной. Но это возможно только в одном случае, если в галактике есть ещё какое-то невидимое вещество, которое не заканчивается так быстро, как звёзды. Таким образом, астрономы открыли, что галактики окружены огромными невидимыми массивными шубами (по-научному — гало).

Вспомним, что закон Кеплера справедлив тогда, когда мы измеряем движение тел небольших масс в поле гравитации сферического или точечного тела. Между Меркурием и Солнцем, да и любой другой планетой системы, практически пустота! Конечно, воскликнет придирчивый читатель — галактики вовсе не шары и вовсе не точки! Звёздная масса распре-

делена по всему некруглому телу галактики. Но даже вне светящейся части галактики скорость не убывает, значит и там есть какая-то несветящаяся масса. Она и портит закон Кеплера!

Так было найдено ещё одно свидётельство существования тёмной материи во Вселенной. Так может это холодный, невидимый газ Вселенной? Нет, холодный водородный газ испускает радиоволны с длиной волны 21 см, и мы точно знаем, что его массы не хватит объяснить постоянство скорости вращения галактик на больших расстояниях. Много десятилетий астрономы искали то, из чего сделано скрытое вещество. Сотни научных статей десятки научных групп пытались определить массу невидимого вещества и найти простое астрономическое объяснение его количеству. Самое оригинальное решение предложил Богдан Пачинский — замечательный польский астроном и астрофизик, последние годы жизни проведший в том самом Принстонском университете, в котором работал Эйнштейн. Он предположил, что тёмной материей могут быть холодные почти невидимые с далёких расстояний звёзды малой массы — коричневые карлики. Он же предложил метод поиска таких объектов на больших расстояниях в галактиках! Но скажу сразу, что мы до сих пор не знаем, из чего состоит скрытая материя. Для простоты физики придумали особые частицы WIMP[40] (Wickly Intaracting Massive Particle), которые практически не вступают в реакцию взаимодействия с обычными частицами, но зато создают

[40] Wickly Intaracting Massive Particle — слабо взаимодействующая массивная частица.

вместе мощное гравитационное поле, которое наверняка и связывает странное скопление Галактик в Волосах Вероники. Но мы точно знаем, зачем она нам нужна!

Для чего нужна тёмная материя?

Итак, измеренная плотность Вселенной на наших глазах повышается, грозя достигнуть гипнотического значения, имени Игоря Новикова, $\Omega = 1$. Однако тысячи проведённых измерений показали, что общая плотность тёмной материи близка к **25 %**, что в купе с обычным барионным веществом даёт $\Omega = 0{,}3$ — не больше! Т. е. это сама по себе гигантская масса тёмного вещества, которая полностью переворачивает наше представление о Вселенной. Оказывается, наша Вселенная в основном состоит не из обычного вещества, из которого слеплены звёзды, планеты, астероиды и люди, а из какой-то неизвестной субстанции. Не слишком ли высокая цена за то, чтобы подтвердилась гипотеза Новикова? Тем более за тёмную материю — эту новую сущность, которую, согласно принципу Окама, желательно вообще было отрезать и выкинуть из нашей картины мира? Но, оказывается, ничего выкинуть нельзя. Более того, именно благодаря скрытой материи мы и появились в нашей Вселенной.

Вспомним первую ложку дёгтя из первой главы книги. В идеально изотропной однородной Вселенной не могут возникать объекты! А объектов этих вокруг нас видимо-невидимо. Мы сами — объекты («*А может — субъекты?*» — *Уфф*). Конечно, ничего идеального в мире нет. Значит, даже в далёком прошлом

должны быть хоть какие-то неровности — эти микроскопические зёрна будущего многообразия жителей Вселенной — галактик, звёзд, планет и людей. Но самым далёким видимым объектом Вселенной является её фотосфера — воображаемая светящаяся, но непрозрачная поверхность, на которой, подобно солнечной, должны быть пятна! Но их там нет! С точностью до одной десятой процента реликтовое излучение изотропно! А согласно решению Лифшица плотность возмущений растёт по закону:

$$\Delta\rho/\rho \sim R \sim 1/(1+z) .$$

Т. е. с момента образования фотосферы, когда размер Вселенной был в 1000 раз меньше (z = = 999—1000), они могут вырасти только в тысячу раз. Значит, никаких звёзд и галактик не должно быть? И нас тоже!?

А может быть, флуктуации плотности есть, но мы их не видим!? («*То есть, как это*?» — *Уффф*.) Ну, представим себе, что ещё ко времени формирования фотосферы, в этой начальной плазме уже плавали острова — протоскопления и острова — протогалактики, а может быть и протозвёзды! Только все это было не в обычном веществе, а в тёмном, скрытом от наших глаз! Но ведь скрытое вещество способно притягивать обычное и связывать скопления галактик, например, в созвездии Волосы Вероники, и создавать гигантские галактические шубы, делая постоянной скорость вращения галактик. Почему же скрытые протообъекты не портят фотосферу Вселенной, затягивая обычное вещество своим полем гравитации? Да в том и дело, что под фотосферой вещество непрозрачно. В результате реликтовые фотоны постоянно застре-

вали в обычном веществе и не пускали его в лапы тёмному веществу! Когда же Вселенная просветлела, туман рассеялся, обычная барионная плазма потекла в приготовленные тёмной материей потенциальные гравитационные ямы, но уже не согласно формуле Лифшица, а гораздо быстрее — со скоростью свободного падения. Вот и получается: и овцы целы, т. е. галактики и звёзды образуются, и волки сыты, т. е. фотосфера чистенькая без всяких загогулин! И ложка дёгтя превратилась в целую банку правильного мёда! *Уффф!*

Семена и плевелы — открытие флуктуаций реликтового излучения

Предположим, дорогой читатель, глаза у нас не оптические (как у нормальных жителей Земли), а радиоволновые, даже лучше сказать — микроволновые. Вот представьте, что вас кинули в термостат с температурой 3 К и дали такое зрение. Холодно там, поди? («*Вот тебе и русская печка!? Это ж настоящий холодильник — тут сподручнее сверхтекучесть гелия устраивать или сверхпроводимость кафеля*» — *Уффф.*) Да, скучная здесь обстановка, куда ни глянь везде одно и тот же космический холод — абсолютно чёрный и изотропный. Кстати, глаза эти микроволновые больше напоминают уши. Антенны делаются в виде рупоров, наподобие того знаменитого слухового устройства, которым пользовался самый великий велосипедист России — Эдуард Константинович Циолковский. (Кстати, этот велосипедист, как и Петя, обязательно появится на наших страницах.).

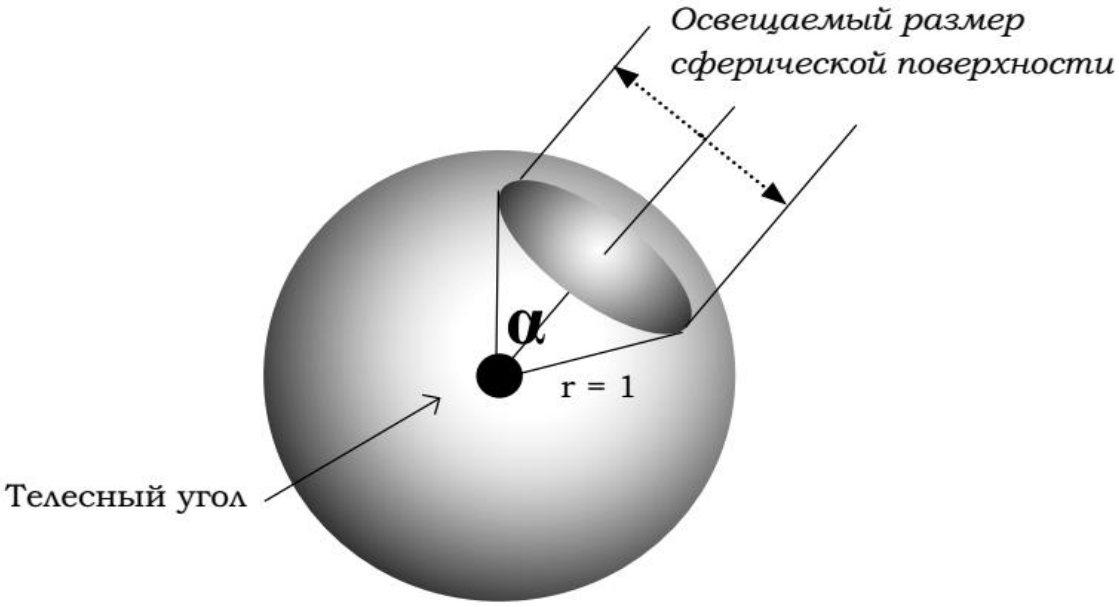


Рис.17

В астрономии наряду с обычными плоскими углами, очень популярны углы с чудным названием — углы телесные (рис. 17). На самом деле, они такие же бестелесные, как и обычные, но все-таки не плоские и очень похожи на старые слуховые аппараты. Измеряются они не в радианах и градусах, как обычные, а в стерадианах или квадратных градусах. Вычисляются путём деления площади сегмента сферы произвольного радиуса на квадрат этого самого радиуса. Так как площадь шара равна $\mathbf{4\pi R^2}$, то максимальный телесный угол равен 4п стерадиан — это телесный угол всей небесной сферы. Если направить такой рупор на небо, то вся энергия фотосферы Вселенной, охваченная конусом, провалится в этот конус. Энергия эта не будет зависеть от радиуса сферы — ведь лучи не пересекают стенки конуса, да и сферы воображаемые. Более

того, если разделить полную энергию, приходящую с неба в этом конусе, на телесный угол, то эта удельная энергия, называемая поверхностной яркостью, вообще не будет зависеть от телесного угла. В разделе про русскую печь и термодинамическое равновесие мы доказали, что универсальная функция, описывающая спектр чёрнотельного излучения, определяется только двумя независимыми параметрами — длиной волны и температурой. Если, согласно предсказанию Георгия Гамова, небо светит как абсолютно чёрное тело, то на данной длине волны яркость его описывается только одной величиной — температурой реликтового фона. Следовательно, если в вершине конуса поставить радиоприемник, настроенный на одну частоту, то интенсивность света полностью будет определяться только температурой! Попросту других параметров то и нет! Следовательно, измеряя интенсивность, «радиоухо» фактически становится идеальным термометром Вселенной. Направляя его в разные части неба — мы можем прямо измерять температуру фотосферы Вселенной.

Средняя температура Земли близка к 300 К. Земля примерно в 100 раз горячее реликтового излучения, и сидя в такой бане, измерить вариации на уровне десятитысячных долей градуса крайне сложно. Поэтому лучше всего запускать такие уши в космос. Там и прохладнее и меньше радиостанций. Так и решили астрономы США и СССР в конце 70-х годов прошлого века. Причём, независимо от американцев, идею космического градусника выдвинул советский астрофизик Николай Семенович Кардашёв. И началась гонка: кто первый обнаружит температурные пятна на фотосфере Вселенной.

В этой, очень спорной в смысле приоритета, области, я процитирую Дмитрия Скулачёва, который вместе с руководителем лаборатории Института Космических Исследований Игорем Струковым, впервые реализовал идею Николая Кардашёва — космического эксперимента Реликт-1, — проведённого в Советском Союзе.

«Наблюдать реликтовый фон средствами наземной радиоастрономии довольно сложно: сигнал слабый, а приёму серьёзно мешает земная атмосфера. Пытаясь найти выход из положения, в 1974 г. группа американских учёных предложила проект под названием COBE (*Cosmic Background Explorer* — космический исследователь фона). Измерения намечали проводить с борта искусственного спутника Земли, с помощью приёмников-радиометров инфракрасного и микроволнового диапазонов.

Независимо от американцев в самом начале семидесятых советский астрофизик Николай Кардашёв также предложил идею исследовать реликтовое излучение из космоса».

На вклейке 15 представлена фотография проведения первого в мире космического эксперимента по измерению флуктуаций реликтового фона Вселенной Реликт-1. (Дмитрий Скулачёв, кандидат физико-математических наук (Институт космических исследований РАН) «Наука и жизнь» №6, 2009)

Американцы параллельно двигали эксперимент COBE, но он сильно запаздывал. На самом деле, эксперименты были разными. Американский эксперимент предполагал создание специальной радиометрической обсерватории, состоящей из нескольких инструментов. Два из них имели прямое отношение

к реликту. Один из них — это был прибор для измерения спектра излучения, надо было доказать, что реликтовое излучение на всех длинах волн является идеальным чёрнотельным излучением с одной и той же температурой. А другой прибор должен был, наоборот, найти неидеальность реликтового фона, но не в спектре, а в изотропии — фактически он должен был найти те небольшие температурные флуктуации (пятнышки), из которых и возникли объекты Вселенной.

Руководителем первого эксперимента был Джон Мазер, а второго — Джордж Смут. Обсерваторию предполагалось вывести на сравнительно низкую орбиту космическим челноком. Но случилась известная трагедия с Колумбией, и старт безнадежно запаздывал.

Советский же эксперимент был направлен в основном на поиски пятнышек — этих Божественных зёрен, из которых через много миллионов лет проросли жители Вселенной — скопления галактик, галактики и звёзды. Один приемник с фиксированной длиной волны, был установлен на серийном космическом советском аппарате серии **Прогноз-9**. Это был маленький остроумный научный довесок, который и мог стать самым успешным советским научным экспериментом в космосе. Результаты его вполне могли быть удостоены Нобелевской премии.

Началась настоящая гонка. Главное, советским радиоастрономам лаборатории Игоря Струкова удалось решить сложнейшую научно-техническую задачу создания в короткие сроки малошумящего приемника радиоизлучения.

1 июля 1983 г. советский спутник «Прогноз-9» успешно вышел на расчётную орбиту — в так назы-

ваемую 3-ю точку Лагранжа, расположенную на расстояниях сравнимых с орбитой Луны. До февраля 1984 г., когда закончилась активная фаза эксперимента, «Реликт-1» сделал около двадцати миллионов измерений. Прибор просканировал всю небесную сферу, причём ряд областей был просмотрен дважды. На вклейке 16 показаны результаты измерений эксперимента «Реликт-1».

По вертикальной оси отложена яркостная температура, по горизонтальным осям — координаты на небесной сфере. Зелёная «гора» в центре — это место, куда летит наша Галактика относительно изотропного хаббловского «пузыря». Помните, как мы надували мыльный пузырь и следили за «плоскатиками»? («*Ну, ты, брат, артист!*» — *Уффф*). На поверхности пузыря всё подчиняется закону Хаббла, только если поверхность не имеет загогулин — объектов. А вот в реальной Вселенной они есть. Загогулина — это не только возмущение плотности, но и возмущение скорости. Галактики не только разлетаются друг от друга по закону Хаббла, но и ещё имеют дополнительные, случайные по скорости. И мы (Галактика Млечный путь) сидим на этой загогулине и со скоростью примерно 600 км/с несёмся в созвездие Гидра. Реликтовые фотоны в этом месте покажутся нам более синими, а в противоположной точке на небесной сфере (она в этих координатах расползается по сторонам квадрата) образуется красное пятно.

Это был один из многих советских экспериментов в космосе, круто опережавших мировой уровень. «Они были первыми» — назвал свою статью один из активных участников того исторического эксперимента Дмитрий Скулачёв. К сожалению, при первой обра-

ботке данных не удалось найти никаких значимых шероховатостей на радио-небе Вселенной. И только через несколько лет, уже к началу 90-х гг., к работе над обработкой подключились советские астрономы Михаил Сажин и Андрей Брюханов, и им удалось найти пятно на челе Вселенной! Однако на Западе не поверили этим данным, и Нобелевскую премию вручили американские астрофизики. В 2006 г. была присуждена Нобелевская премия по физике руководителям группы COBE Джорджу Смуту и Джону Мазеру, хотя российские исследователи обнародовали свои результаты раньше американцев. Последующие десятилетия подтвердили факт наличия флуктуаций на уровне $\Delta T/T = \pm 10^{-4}$.

Сразу после получения Нобелевской премии, Джон Мазер так отозвался о российских коллегах: «Они получили много ценных результатов, но наши всё же оказались лучше». А в Нобелевских лекциях новые лауреаты даже не упомянули о работах русских предшественников. Как будто ракета с «Реликтом-1» просто бесславно взорвалась на старте.

Задача COBE была установить, что реликтовое излучение имеет чёрнотельный спектр и попытаться всё-таки обнаружить хоть какие-то шероховатости на поверхности фотосферы Вселенной. Первая обработка результатов оказалась не очень успешной. Но тут подоспела новая обработка результатов наблюдений советского эксперимента «Реликт-1» в котором таки флуктуации были обнаружены! На вклейке 17 показана копия листка рабочей тетради сотрудника ИКИ РАН Андрея Брюханова — выпускника ГАИШ МГУ имени М. В. Ломоносова, на которой 3 марта 1991 г. ему удалось увидеть в обработанных данных

холодное тёмное пятно на реликтовом фоне! Вещь историческая и должна бы лежать под стеклом в каком-нибудь музее[41].

Совсем недавно опубликованы результаты последних, проведённых в эксперименте «Планк», высокоточных измерений реликтового фона Вселенной. Полученные данные также подтвердили пятно, открытое советскими радиоастрономами *(См. вклейку 18)*.

Невидимый мёд или была ли мобильная связь в древнем Риме?

Итак, первичные флуктуации были найдены и оказались не более 0,01 %. А для объяснения появления объектов нужна была шероховатость на уровне не менее 0,1 %. Вы скажете — ну всего-то один порядок.

К тому же, добавлю я, флуктуации, обнаруженные в Экспериментах «Реликт» и COBE — это флуктуации температуры, а не плотности. Вспомним, что плотность энергии излучения по закону Стефана—Больцмана пропорциональна четвёртой степени температуры: $u \sim T^4$. Но плотность излучения — это фактически давление света. Значит, давление вещества и его плотность флуктуируют в 4 раза сильнее, чем температура. Но вот в чём проблема, чем дальше астрономы заглядывали вглубь Вселенной, тем ближе к моменту рекомбинации (фотосфере) подвигалась точка образования объектов во Вселенной. Сейчас, например, известны сформировавшиеся галактики в эпоху, когда Вселенная была

[41] А хорошая идея — организовать музей исследования Вселенной.

в 10 раз меньше, т. е., если следовать теории Лифшица, контраст плотности мог вырасти только в 100 раз и на фотосфере флуктуации должны были быть ещё в 10 раз больше. Но нет таких загогулин!

Часто на семинарах, когда докладчик пытался доказать что-либо отсутствием сопутствующих эффектов, Я. Б. Зельдович любил повторять тот факт, что археологи при раскопках развалин древнего Рима не нашли электрические провода, вовсе не означает, что в древнем Риме жители пользовались радиосвязью («*Или мобильной*» — *Уффф.*)[42]. Мы бы оказались горе-учёными, если бы пытались доказать наличие тёмной материи по отсутствию пятен в реликтовом излучении. Но, слава Богу, у нас ситуация не такая: скрытая материя не видна, а вот заметное влияние её присутствия налицо. Ведь если бы не было скрытой материи, то не было бы не только скопления галактик в созвездии Волосы Вероники и скорость вращения галактик менялась бы закону Кеплера на больших расстояниях, но главное не было бы и самих галактик, звёзд и нас с вами, дорогой читатель, во Вселенной!

Скрытая материя оказалась настоящим мёдом для космологии Фридмана. Перед «просветлением», Вселенная состояла из наваристого бульона. Фотоны были намертво связаны с веществом, постоянно поглощаясь и излучаясь свободными электронами. Давление света не давало веществу сжиматься и никаких особых загогулин не появлялось. В то же время тёмная материя, не замечая ни фотонов ни ба-

[42] Например, часто пытаются доказать существование чёрных дыр тем, что данный кандидат не является пульсаром. Мол, для того, чтобы возник пульсар, нужна твёрдая поверхность, а у чёрной дыры её нет.

рионов, постепенно оформляла скелет Вселенной под действием самогравитации. В точном соответствии с теорией Лифшица, невидимая тёмная материя собиралась в протогалактики и протоскопления галактик. К моменту «просветления» (300 000 лет после начала Большого Взрыва) контраст скелета структуры Вселенной достиг нескольких процентов. Как только Вселенная «просветлела», фотоны оторвались от обычного вещества. Под действием притяжения со стороны тёмного вещества, барионы, как пчёлы на мёд, начали слетаться и застревать в протоскоплениях и протогалактиках. Так скрытое вещество позволило решить парадокс отсутствия начальных флуктуаций в реликтовом фоне. Правда, при этом оказалось, что наша Вселенная потолстела в 6 раз и стала двухкомпонентной. Причём самая упитанная её часть — скрытая материя — вообще неизвестно из чего сделана. И кто же эти таинственные пчелы, которые несут невидимый мёд?

Ложка дёгтя номер 2 и апория велосипедиста Пети

Итак, советские и американские космические обсерватории доказали — на фотосфере Вселенной, как и на Солнце — есть пятна! Но найденные шероховатости оказались очень маленькими. Их недостаточно было, что бы породить объекты Вселенной без скрытой материи. Температура фотосферы Вселенной оказалась постоянной по всей небесной сфере с точностью 0,01 %. Значит разные уголки Вселенной как-то договорились иметь одинаковую температуру в этой «римской империи» 13,6 млрд лет назад. Наверное, предста-

вители провинций собрались в вечном городе сверить, так сказать, термометры, а потом разъехались по городам и весям. Но, оказывается, этого не могло произойти — у них не было времени, поскольку Вселенная расширялась слишком быстро. По закону Кеплера расстояние между любыми точками увеличивалось: $R \sim t^{2/3}$. В то же время расстояние, куда доходили вести из форума (информационный горизонт) менялось линейно: $R_{инфо} = ct \sim t$. Когда Вселенная была молоденькой $t \to 0$, и вся Вселенная была мало информированной $R_{инфо} << R$. Ну, на самом деле, в ранней Вселенной закон Кеплера нарушался. Это было связано с тем, что реликтовое излучение в прошлом превышало по массе все остальное и полностью контролировало закон её расширения. Эта эпоха в жизни Вселенной называется радиационно-доминированной.

Это уже не закон Кеплера. Может быть, Вселенная станет причинно-связанной при таком законе расширения? Нет, увы. В начале расширения Вселенной информационный горизонт становится ещё меньше, чем в кеплеровском случае:

$$R_{инфо} / R \sim t / \sqrt{t} \sim \sqrt{t} \to 0 \text{ при } t \to 0.$$

Парадокс не решается. Надо сказать, что немногих беспокоил этот парадокс. Обычный ответ на вопрос, почему в разных, ничего не знающих друг о друге областях Вселенной, температура реликтового излучения практически одинакова, был математически бездушен: таковы начальные условия. Но когда американский физик Алан Гус в 1980 г. опубликовал свою работу и придумал новый сценарий развития Вселенной, в котором парадокс причинности был объяснён, космологи возликовали.

Инфляция или одним махом четверых парадоксов смертельных убивахом

Инфляцию никто не любит. Правительство с ней борется. Как булыжник — орудие пролетариата, так инфляция — орудие оппозиции. Самый бедный народ — студенты — страдают.

Что такое инфляция? Это знает каждый студент и чувствует на своем собственном животе. Каждый месяц он получает одну и ту же стипендию. Но если печатный станок в стране работает, то полное количество денег в стране постоянно растёт. Покупательная способность денег падает. Студенты становятся все беднее и беднее. Кошелек студента не худеет, а худеет обладатель кошелька. Растут цены, зарплата студента обесценивается. Инфляция.

Но, оказывается, инфляция может быть и полезной.

Мы не пишем учебник. Наша задача не просто передать голые проверенные знания, а рассказать о том, как добываются новые знания. На этом пути, напоминающем буйное дерево с множеством ветвей и ответвлений, ошибки (высохшие ветви) и заблуждения (неправильно привитые веточки) так же, и даже более, важны, чем единственно правильный прямой путь, которого на самом деле никогда не было. На рисунке 18 изображено дерево Галилея, скетч, который я сделал на знаменитой обсерватории Арчетри (предместье Флоренции, Италия), в 20 мин ходьбы от дома, в котором жил Галилей во время своей ссылки.

В 1980 г. американский физик Алан Гус написал ошибочную работу, которая тут же стала страшно популярной среди космологов (в первое время его фа-



Рис.18

милия Guth переводилась на русский так же, как фамилия национального чешского героя Яна Гуса, и это придавало определённый романтический шарм его результатам). Алан Гус показал, что можно одним ма-

хом решить сразу три проблемы стандартной космологии — разрешить парадокс причинной несвязанности Вселенной и заодно показать, почему Вселенная расширяется со второй космической скоростью и её плотность практически равна критической. Была и ещё одна проблема, о которой мы скажем чуть позже. Для этого, оказывается, достаточно ввести в космологию некое скалярное поле из физики элементарных частиц.

Итак, давайте присмотримся к стандартной модели Вселенной. Кривая увеличения её радиуса вначале растёт по закону броуновского движения $R \sim t^{1/2}$, а потом переходит в кеплеровский закон: куб радиуса пропорционален квадрату времени $R \sim t^{2/3}$. И та, и другая зависимости порождают необъяснимо однородную, изотропную при этом не проинформированную (причинно не связанную) Вселенную.

Теория поля

Конечно, не Алан Гус первым ввёл во Вселенную скалярное поле. Первыми это сделали Гук с Ньютоном. Вторым физическим полем, открытым человечеством, стало электромагнитное поле или электромагнитное взаимодействие. Хотя как явление оно было осознано раньше тяготения. Да вовсе не гравитация, а именно электрическое поле стало первым физическим взаимодействием, осознанным человечеством. Как же так — мы с детства погружены в гравитационное поле Земли, каждый божий день со дня рождения и до смерти пытаемся преодолевать силу тяжести, которая, в конце концов, побеждает нас, не замечали её как сущность. Ответ простой. Человек почти

не замечает обыкновенные вещи, которые могут быть настоящим чудом природы или наоборот ужасным её извращением. Иногда это полезно. Например, советские люди ходили по улицам, дома которых были увешены портретами партийных лидеров, абсолютно их не замечая. Так, прохожий не замечает надоевшую рекламу или физиономию шоу звезды, и ветер полощет на улицах стран развитой демократии опостылевшие фотографии предвыборных кандидатов. Но тут же бросается к чему-то непривычному. Тяготение слишком привычно, а его чудесность стала проясняться только через 2000 лет, после электричества во времена Тихо Браге, Кеплера и Галилея. Гук стал тем яблоком, которое осенило Ньютона, и тот вывел правильную, но непонятную формулу. Но как отдельное универсальное явление открыл и осознал его впервые Кеплер, опираясь на наблюдения планет астрономом Тихо Браге.

Электричество было известно и в Египте, и в древних Китае, и Индии. Но древнегреческий философ Фалес, по-видимому, первым описал его как отдельное явление. Стоило подобрать на берегу моря камешек янтаря, потереть его шерстью и он начинал притягивать пылинки и мелкий голубиный пух. Было это вблизи древнегреческого города Магнезии. Отсюда слово магнит. Магнит и Электра — это величайшее мистическое совпадение пробило прямо в сердце первого физического взаимодействия, имеющего двуликую природу — электромагнетизм!

Электричество было чудесным — она сыпало искрами, поднимало к небу пышные волосы электрических женщин, громыхало, сверкало огненными зигзагами в Землю. Его мистическая сущность притягива-

ла жителей Нью-Йорка всего лишь сотню лет назад, когда великий серб Тесла, устраивал свои леденящие душу опыты и грозил управлять ураганами в обоих полушариях Земли.

Короче говоря, трудно было обойти стороной электромагнитные явления, но всё-таки первой была формула Ньютона для силы тяготения. Согласно Ньютону, любые тела обладают неким параметром под названием гравитационная масса. Эту массу могут почувствовать другие тела. Однако если мы хотим понять, как устроено гравитационное поле, создаваемое массой *M*, другое тело должно быть маленьким по сравнению с ним. Тогда оно не изменит существенно свойства гравитационного взаимодействия своим присутствием.

Давайте для простоты сделаем одну массу очень маленькой — её называют пробным телом и пробной частицей. Вы скажете, почему пробная? Что она будет пробовать? Дегустировать она будет особую физическую жидкость — гравитационное поле! Ну, так и говорите — жидкость, а причём тут поле? («*Пшеничное или кукурузное, кстати? А русское поле?*» — *влез Уффф.*) Нет, конечно. Это необычная жидкость, но она, подобно воде во времена всемирного потопа, заливает все уголки Вселенной. Согласно теории Ньютона пробное тело, даже неподвижное, в результате будет обладать потенциальной энергией равной гравитационному потенциалу. Потенциал — это почти потенциальная энергия. Только она рассчитывается не на всю массу тела, а на её единицу. Например у поверхности Земли, где мы живём, включая время проведённое на воздушных шарах, самолетах и орбитальных станциях единичной массы, с точностью до любого слагаемого равна $\boldsymbol{mgh + const}$. Константа не

важна для жизни. Вот, например, если велосипедист Петя падает с велосипеда, то, в общем, все равно на какой высоте это происходит. Важна разность высот. («*Да ты убил давно уже своего Петю. Он тебе только и нужен как падающее тело*» — *Уфф*.) Или положим, как в том физическом анекдоте, когда студент похвастался, что упал с двадцатиметровой лестницы, его спросили: и как? Да ничего особенного — я стоял на первой ступеньке. Поэтому физики договариваются, что гравитационный потенциал тела массой M — это потенциальная энергия одного грамма вещества в её поле тяготения:

$$\varphi = -GM/R.$$

Но ведь энергия не может быть отрицательной!? Э нет, это кинетическая энергия не может, а потенциальная вполне. Важно только, что бы она увеличивалась при удалении тел. Фактически потенциал — это работа, которую нужно совершить, чтобы переместить пробное тело из бесконечности в данную точку. Эта работа отрицательна, потому что за вас её делает гравитационное поле. Именно поэтому можно вырабатывать электричество за счёт падения воды в гидроэлектростанциях.

Гравитационное поле ньютоновской теории является скалярным. Что это значит? Это значит, что его можно описать одной величиной — потенциалом. Грубо говоря, гравитационное поле Ньютона — это что-то вроде заставки к фильму Матрица. Помните черный экран дисплея, заполненный бегущими цифрами. Только цифры у Ньютона упорядочены и равны гравитационному потенциалу. Например, если вы хотите узнать какую работу надо совершить, чтобы

поднять кирпич Гегеля на Пизанскую башню, то вам вовсе не нужно знать, как вы туда поднимались — на лестнице по спирали или на лифте по прямой. Полная работа против сил тяжести всегда будет одинаковой и равной разности двух потенциалов: первого на зеленой травке вокруг колокольни Пизанского собора, и второго — на самой верхушке колокольни. Это общее свойство скалярных полей — работа по перемещению пробных тел не зависит от пути, по которому они перемещаются.

Сила притяжения между телами пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния. Так вот оказалось, что янтарь притягивает другие потертые вещицы по тому же самому закону обратных квадратов. Так может быть электрическая сила как то связана тяготением? Ничего подобного — сказал создатель теории электромагнетизма Максвелл. Да в электрических взаимодействиях участвуют электрические массы, но эти массы совсем не похожи на гравитационные. На самом деле, есть сложное электромагнитное взаимодействие, которое в одних случаях проявляет себя как взаимодействие двух зарядов подобно гравитации. А в других оно действует вообще без зарядов! Например, два витка электрического провода нейтральны, но отталкиваются подобно одинаковым полюсам магнита. Или, наоборот, притягиваются если токи у них параллельны.

Физическую теорию электромагнитного взаимодействия впервые построил великий Максвелл. Она оказалась существенно сложнее, чем теория Ньютона. Оказалось, что электрические массы действительно существуют, но они совершенно не связаны с грави-

тационными массами, определяются неким электрическим зарядом, причём разных знаков. О чём, конечно, человечество знало с давних пор. Только в очень редких случаях электромагнитное поле напоминает гравитационное — эти случаи описаны в учебниках по электростатике. В общем случае электрическое поле является векторным и описывается так называемым («*Кем?*» — *Уффф*) вектор-потенциалом, состоящим из четырёх чисел: вектора $\boldsymbol{A}$ и скалярного числа $\boldsymbol{\varphi}$. Напомню, что вектор это стрела — она в нашем пространстве описывается тремя числами — три проекции на три оси пространства.

Итак, пошло поехало. Электромагнитное поле оказалось сильно сложнее гравитационного. Но оно оказалось и гораздо сильнее гравитационного. Давайте посчитаем силу притяжения протона и электрона по кулоновской и по ньютоновской формулам. Их отношение будет (расстояние сократится)

$$F_{\text{кулон}}/F_{\text{ньютон}} = e^2/Gm_pm_e \approx 10^{40} \text{ раз!}$$

Вот это да! Почему планеты и звёзды, и небесные механики[43] поклоняются гравитации в то время, как рядом с ними бесконечно более громадные силы? Ответ прост, Луна и Земля электронейтральны. Да, в Луне и Земле огромное количество электронов и протонов — но их одинаковое число, и они компенсируют заряд друг друга. Планеты и звёзды электронейтральны! Да с какой же точностью надо компенсировать заряды, и кто ту настройку тонкую

[43] Небесные механики — это такие астрономы, которые занимаются движением небесных тел, а небесные тела подчиняются законам гравитации.

осуществлял — спросит вдумчивый читатель («*Да уж, к этой странице других не останется*» — *Уффф*). Да сами же кулоновские силы и стягивали вместе положительные и отрицательные заряды — в результате Вселенная оказалась практически электронейтральной, как электрические цепи в вашем компьютере, или в вашей нервной системе.

Ну, слава Богу, можно было бы воскликнуть в этом месте, Вселенная управляется простым скалярным полем — гравитационным! Но тут в физике настала пора обрушений и переворотов. Сначала Планк (1900 г.) ввёл постоянную Планка. Потом Бор (1910 г.) придумал свои постулаты Бора. И не прошло и 15 лет, как в 1915 году. Альберт Эйнштейн изгнал из физики единственное скалярное поле. Он создал теорию гравитации, в которой поле гравитации не просто напоминало бегущие цифры из кинофильма Матрица, а каждая точка пространства вокруг самой простой тяготеющей массы напоминала математическую матрицу — с 16-ю числами по горизонтали и по вертикали. Такую матрицу математики называют тензором. Их перемножение в эпоху отсутствия персональных компьютером напоминало одно из самых скучнейших занятий в физике, и им могли заниматься только самые отчаянные учёные-космологи, которые понимали, что каждое сворачивание тензоров, каждая переброска индексов, каждая ковариантная производная — это переворот в огромных мирах — Вселенных, в которых нарождаются целые миры и возможно разумные цивилизации. Наверное, в такие моменты космологи чувствовали себя повелителями Вселенных.

Но этим не исчерпывается многообразие сил в природе. Если для открытия сил гравитации понадобился

телескоп и Тихо Браге, то открытие третьей важной физической силы, другие физические взаимодействия и их поля, открылись человечеству не в огромном космосе, и не на берегу Эгейского моря, а в химической лаборатории.

Вселенная как Черёмушки или мир глазами первого дальтоника

Задумывался ли ты, дорогой читатель когда-нибудь, почему мы не тонем в воде? Ну не совсем не тонем, но достаточно набрать легкими несколько литров воздуха, лечь на спину — и, пожалуйста, мы становимся водоплавающими, от слова воздухоплавающими. Конечно, все знают Архимеда из Сиракуз, по дороге в которые я однажды встретил кафе «$E = mc^2$». Там, в музее Архимеда, можно найти десятки открытий и изобретений гениального грека, среди которых знаменитый закон Архимеда: сила, выталкивающая тело из воды, равна весу вытесненной данным телом жидкости. Плавающие и тонущие тела разделены простым условием: средняя плотность тела должна быть меньше плотности воды (1 г/см^3). Но нам, чтобы плавать почти не требуется усилий, дыши глубже и разглядывай небо. Значит, плотность нашего тела, тела двуногого разумного существа Вселенной почти равна 1 г/см^3. А если посмотреть вокруг астрономическим взглядом, мы увидим, что средняя плотность планеты Земля равна 5 г/см^3, что практически то же самое. Я уж не говорю о плотности Солнца, которая точно равна грамм в кубике! Планеты, звёзды, астероиды и даже ядра комет — все они имеют плотность порядка

1 г/см^3. Все они имеют что-то общее! Возьмите, например, среднюю плотность галактик, она равна **10^{-22} г/см^3** — это уже совсем другое тело. Ну, уж плотность Вселенной ещё в миллион раз меньше. Что же объединяет перечисленные выше тела?

Чтобы здесь разобраться, нам придётся познакомиться с английским ученым-самоучкой Джоном Дальтоном. Таких как Дальтон, теперь называют в лучшем случае графоманами, «одержимцами», горе-изобретателями, а в худшем — просто сумасшедшими. «Его инструменты, сделанные в основном своими руками, не были приспособлены для получения аккуратных результатов, а его манера экспериментирования была небрежной, если не сказать неряшливой», — писал один из его биографов.

Время таких людей в науке безвозвратно прошло («*Может, это говорит о приближающемся конце науки?*» — *Уффф*). Последним из них был школьный учитель из города Бобруйска — Константин Эдуардович Циолковский. А раньше... О, раньше было их время. Они, как Леонардо да Винчи, интересовались всем. Природа благосклонно принимала их пытливые взгляды и намеки, и отдавала им самые сокровенные тайны мироздания. Мне больше всего нравится их называть естествоиспытателями, натурфилософами, ну и на худой конец — искателями. Таким был первый дальтоник мира — английский самоучка Джон Дальтон. Он сам болел дальтонизмом, сам его описал (открыл) и теперь оно называется его именем. Он разбрасывался (как теперь сказали бы строгие профессионалы) по разным наукам с таким размахом, который сегодня уже не под силу одиночкам.

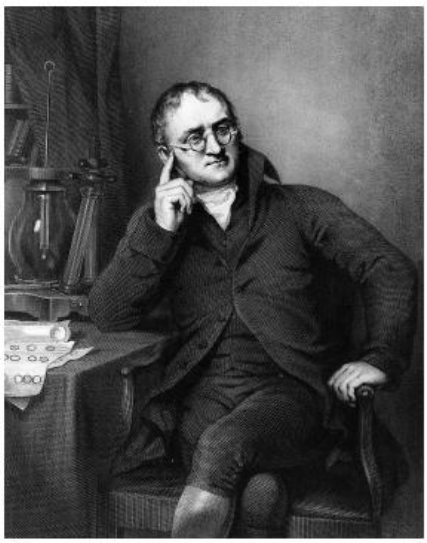


Рис. 19 Джон Дальтон (1766—1844)

Но вот именно о нём мы сейчас расскажем, следуя замечательной популярной книжке Матвея Бронштейна — одного из членов ленинградской Джазбанды, — жизнь которого сложилась самым трагическим образом.

В 1808 г. Джон Дальтон опубликовал книгу с чудны́м для современного уха названием «Новая система химической философии». В ней он впервые экспериментально доказал, что материя состоит из атомов. Гипотеза атомного строения материи, через две тысячи лет после её обнародования Демокритом, получила экспериментальное подтверждение. Причём это удалось сделать с помощью обычных химических колб и сосудов и математической логики. Кроме того попутно он нашёл метод определения атомного веса химического элемента, который никак не удавалось найти в течение предыдущих 2000 лет.

Это очень важный момент нашей книги о Вселенной. Атом — это объект размером в десять раз меньше модного сегодня нанометра, как его можно увидеть, не используя микроскоп?

Давайте возьмем газ водород массой 2 г и попробуем его полностью сжечь (не повторяйте это сами). Реакция окисления водорода была известна давно и заканчивалась лужицей воды. Оказывается, что бы водород сгорел полностью, для этого всегда был необходим кислород массой именно 16 г, а в лужи-

це оказывалась вода массой ровно 18 г! Важно, что отношение масс газов способных сгореть полностью всегда было равно целому числу. Т. е. не 8,5, как, например, в фильме великого итальянца Феллини, а именно целое число — 8! Когда химики принялись повторять эксперимент Дальтона с другими газами, выяснилось, что массы вступивших в реакцию горения газов всегда относились как целые числа! Это значит, что в природе есть некая мелкая частица — неделимая!

Я не зря вспомнил гениального кинорежиссера Фредерико Феллини. Поговорим о фильмах! В России под Новый Год все смотрят фильм Эльдара Рязанова «С легким паром». Сюжет фильма основан на том, что главный герой, попадая в новостройку в другом городе (в Ленинграде, кстати, куда и едет Петя), не может отличить её от своей московской, в которой он живёт. Этот сюжет стал возможен только благодаря тому, что в 60 и 70-е гг. все новые дома собирались из однотипных панелей. Очевидно, что все смешные и грустные события этой новогодней истории стали возможными только в мире, где работает лишь один генеральный застройщик — государство. Посмотрите на рисунок поэта Андрея Лазученкова «Многоэтажки» (2001 г.)[44] (рис. 20).

---

[44] Очевидно, Андрей Лазученков обладает удивительным и редким даром — найти интересное в самом обычном. Передать настроение стандартного пейзажа, опостылевшего всем его жителям, с тревожными, нечистыми подъездами, с холодными бетонными серыми квадратами. И все это угадывается, но ещё абсолютно очевидно — пейзажи Андрея населены человеками, теплы и задумчивы. http://www.pereplet.ru/news/index.cgi?id=7469#7469

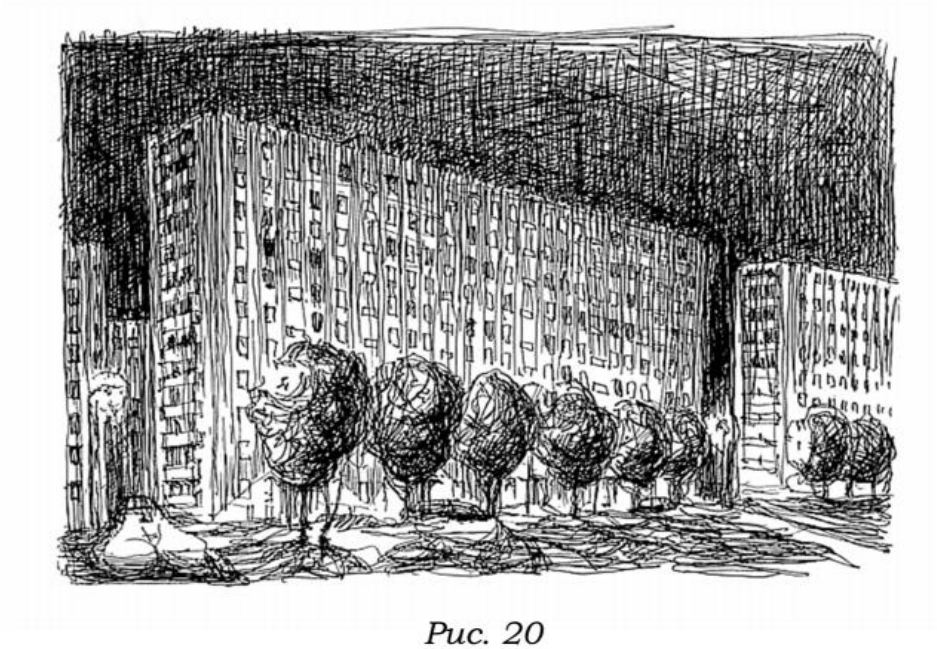


Рис. 20

Панельные дома устроены просто. Однотипные квартиры (как правило однокомнатные, двухкомнатные, трёх- и реже четырёхкомнатные) располагаются одна над другой. Вместо веса можно воспользоваться близким для горожан термином — высотой потолков. Высота потолков в таком доме всегда определяется высотой стенной панели — элементарного атома этой железобетонной Вселенной. Теперь представьте себе, что вы ничего не знаете ни о панелях и ни об этажах. Вы входите в подъезд дома, измеряете сантиметром высоту лестничной ступеньки и считаете количество ступенек с первого до последнего этажей. Потом вы заходите в соседний дом, или в любой другой дом с другим количеством этажей и подъездов, и проделываете те же измерения. Обойдя много домов, вы увидите, что отношение высот домов будет всегда отношением целых чисел! Ведь высота дома, делённая на число этажей, — это высота стенной панели, которая и есть атом многоэтажки — постоянная величина для данного типа застройки.

Однако если вы забредёте в кирпичный дом, или из «брежневки» зайдёте в «хрущевку»[45], то ответ может быть совсем другим и отношение может оказаться не целым. Что же это за аналогия, если она не работает. Да нет, отличная аналогия. Атомы вещества устроены из универсальных блоков, но ещё более одинаковых, чем советские застройки! Будто наша Вселенная и вправду — Черёмушки. Значит, полной аналогией химического устройства Вселенной может быть только такой особый Советский Союз, с такой особой тоталитарной градостроительной политикой, что все панели должны иметь одну высоту! Вот эти панели и есть элементарные кирпичики Вселенной! Значит, Дальтон и его последователи открыли не просто атомную структуру материи, но они открыли то, что каждый атом состоит из целого числа элементарных кирпичиков, масса которых равна массе водорода. Говоря современным языком, вес атомов определяется числом элементарных частиц нуклонов — протонов и нейтронов (примерно одинаковой массы). Электроны, которые конечно важны для атома, в его массу особого вклада не дают. Таким образом, Дальтон нащупал строение не просто атомов, а ядер атомов!

Дальтон не знал, что формула воды **H_2O** и полагал её **HO**, и у него получалось, что кислород в 8 раз тяжелее водорода, а не 16, как мы думаем теперь. Буквально тут же французский ученый Джозеф Луи Гей-Люссак (которого мы знаем по «газовому закону Гей-Люссака»,

[45] «Брежневки» и «хрущёвки» — народные названия панельных застроек времён правления Никиты Сергеевича Хрущёва (1955–1964), и Леонида Ильича Брежнева (1964–1982). Официально «хрущёвки» назывались Черёмушками. В Москве «хрущёвки» уже снесены повсеместно.

а ты, *Уффф*, молчи!) сделал очень важное открытие: объёмы двух газов, вступающих в реакцию горения, всегда относятся друг к другу как простые целые числа. Именно объёмы, а не массы, а это уже некая новая истина! Например, чтобы сжечь один объём кислорода надо использовать два объёма водорода. Но точнее всех оказался Амедео Авогадро, чьё число мы изучаем в школах и теперь. В 1811 г. он придал новому закону окончательную формулировку: в равных объёмах газов содержится одинаковое количество молекул при одних и тех же температуре и давлении. Тот же водород массой 2 г занимает объём 22,4 литра. Такой же объём занимает и молекулярный кислород массой 32 г, но весит он в 16 раз больше! Значит, атомный вес можно определить, измерив плотность газа — величину макроскопическую, осязаемую, «фотографируемую» и вполне поддающуюся нашей обыденной бытовой интуиции[46].

Это закон элементарно выводится из уравнения состояния идеального газа, которое в свою очередь основано на молекулярной гипотезе — газ состоит из малых частиц, энергия взаимодействия которых много меньше их кинетической энергии.

---

[46] О жарких дискуссиях того времени написал Д. И. Менделеев: «В 50-х годах одни принимали O = 8, другие O = 16, если H = 1. Вода для первых была HO, перекись водорода HO_2, для вторых, как ныне, вода H_2O, перекись водорода H_2O_2 или HO. Смута, сбивчивость господствовали. В 1860 химики всего света собрались в Карлсруэ для того, чтобы на конгрессе достичь соглашения, однообразия. Присутствовав на этом конгрессе, я хорошо помню, как велико было разногласие, как с величайшим достоинством охранялось корифеями науки условное соглашение и как тогда последователи Жерара, во главе которых стал итальянский профессор Канниццаро, горячо проводили следствия закона Авогадро».

Действительно, давление, которое оказывается частицами газа на стенку — это сила на единицу к площади. Но сила — это импульс, переданный стенке в единицу времени. Количество частиц, которое в единицу времени наскакивает на единичную площадь стенки в единицу времени равно $\sim(2/3)\rho v$ (частицы летят по трём направлениям с одинаковой вероятностью), где m — масса частицы газа, а v — средняя скорость молекул или атомов. Каждая частица передает импульс, равный $2mv$. Отсюда магическое число 2/3! Поэтому импульс, переданный в единицу времени (сила) через единичную площадку (давление), равен произведению плотности газа на средний квадрат скорости: $2/3\rho v^2$. Но средний квадрат скорости определяется как $\langle mv^2/2\rangle = 3/2kT$. Отсюда получаем уравнение идеального газа:

$$p = (2/3)\rho v^2 = 2\,(M/V)kT/m = \\ = 2\,(kM/m)T/V = RMT/V\mu,$$

где $R = k/m$ — универсальная газовая постоянная, μ — молярная масса. Или в более привычном виде

$$p = \rho RT/\mu.$$

Напомним, что плотность газа это масса газа, делённая на объём газа $\rho = M/V$. Теперь видно, что масса газа и объём газа пропорциональны и ведут себя одинаково при постоянной температуре: $V \sim MT$. Применение молекулярной гипотезы привело к простому пониманию поведения газов! Но отсюда никак нельзя было найти размер самих молекул или атомов, а только лишь расстояние меду ними.

Последующие 100 лет понадобились научному сообществу, чтобы, наконец, нащупать размер мельчайших, как тогда считалось, кирпичиков вещества.

Учёные придумали десятки методов определения размеров атомов — от измерения броуновского движения тяжелых частиц в газе, до измерения силы света голубого неба! Ведь небо голубое из-за рэлеевского рассеяния света на молекулах воздуха, и голубизна его зависит от размеров молекул! Тут *Уффф* мне подсказывает более простой метод — надо просто взять лужицу воды, образующуюся при сжигании 2 г водорода и поместить в морозильник, потом измерить объём получившейся льдинки, разделить его на число Авогадро (получили для величины N_A приблизительно $6{,}0 \cdot 10^{23}$) и извлечь корень кубический. Давайте прикинем. Объём 18 граммов воды равен 18 кубических сантиметров. Значит, на каждую молекулу воды приходится $\mathbf{18/N_A \sim 3 \cdot 10^{-24}\ см^3}$. Извлекая корень кубический, получаем размер молекулы 10^{-8} см. Размер легчайшего атом водорода оказался равным $\mathbf{\sim 10^{-8}\ см}$, а его вес $\mathbf{\sim 10^{-24}\ г}$. Разделив массу атома на куб его размера, находим, что средняя плотность атома равна плотности воды с «огромной астрономической точностью» («*Любите вы себя, Владимир Михайлович, цитировать*» — *Уффф*).

И Солнце, и планеты и их спутники, и деревья и птицы, и люди имеют одинаковую плотность по одной простой причине — они состоят из атомов, которые не тонут в воде («*Это у него такой юмор, читатель*» — *Уффф*).

Матрица Менделеева или Дорожная карта физической революции

Открытие Дальтона было забыто на 50 лет. И только начиная с 1860 г., когда один итальянский химик натолкнулся на работы Авогадро, химики оконча-

тельно договорились о том, как правильно определять атомные веса химических элементов.

Осталось только понять, почему химические свойства веществ периодически повторяются при монотонном возрастании атомного номера. Надо сказать, что к 1869 г. гениальный русский естествоиспытатель Дмитрий Иванович Менделеев расставил элементы по местам и открыл периодический закон Менделеева, То, что ему приснилась таблица Менделеева, не удивительно, а вот почему ему приснилась правильная таблица, которая позволяла не только исправить обычно измеренные атомные веса химических элементов, но разложить их в порядке определенного номера!

Если бы Менделеев открыл свою таблицу в XXI в., то её назвали бы матрицей Менделеева. Действительно таблица Менделеева была бы матрицей, в которой химические элементы были бы разложены по атомному весу (слева направо) и атомному номеру. Ну что тут, кубик Рубика труднее собрать, сказал бы скородумающий читатель. Да нет, ведь в кубике Рубика каждый квадрат — это просто одно число или цвет. А химический элемент во времена Менделеева это огромный набор прямых и косвенных химических свойств, которые нельзя просто описать в виде цифр. Короче, матрицу Менделеева собрать гораздо сложнее. Поэтому так много у этого открытия оказалось конкурентов-неудачников, которые в той или иной мере создавали таблицы химических элементов. Но только Менделееву удалось правильно разложить элементы по 8 штук в строке с окончанием на благородных инертных газах. Но главное он открыл периодический закон, который опирался на периодическое

повторение свойств элементов, при монотонном увеличении электрического заряда атомов.

Это второе обстоятельство доказывало, что атом — это система элементарных частиц — истинных кирпичиков мироздания, равновесие которого поддерживается электрическими силами.

Тем самым удалось предсказать новые, ещё не открытые химические элементы, которые точно поселились в свои клеточки таблицы Менделеева, подобно счастливым новосёлам московских Новых Черёмушек!

На вклейке 19 показан первый набросок таблицы Менделеева. Не стоит здесь искать знакомые со школы столбцы и строки. Смотрите на это, как на картину, как на офорт великого мастера Вселенной. Все написано, нарисовано от руки! Этого на клавиатуре не изобразишь.

Солнечная система и атом водорода

О том, что в природе есть положительные и отрицательные электрические заряды человечество знало несколько тысяч лет. Но открытие Дальтона фактически проложило путь к пониманию строения атома. Более того, в своей книге о новой химической философии он написал удивительную фразу: «Мы с таким же успехом можем стараться прибавить новую планету в Солнечную систему, как уничтожить или создать атом водорода»[47].

[47] После того как Международный Астрономический Союз выкинул из планет Плутон, с чем я категорически и физически не согласен, стало ясно, что атом гораздо труднее изменить, чем Солнечную систему! *(Уфф)*.

Вот это подсознание, которое даже не снилось Фрейду. Кто мог в 1809 г. представить, что атом водорода — это маленькая Солнечная система, в которой Солнцем является протон (ядро атома), а планетой электрон. Более того, отношение масс планет и звёзд, почти такое же, как электрона и протона. Например, масса самой большой планеты Юпитер в 1000 раз меньше Солнца, что с огромной астрономической точностью совпадает с отношением масс протона и электрона.

Таблица Менделеева оказалась крепким орешком для теоретиков. Сразу скажем, что для её объяснения самое малое, что было сделано — пришлось открыть электрон. Но главное, что пришлось сделать — это покончить с классической физикой! (а вот это была уже настоящая революция). Вообще есть тысяча причин, по которым нужна квантовая механика, но таблица Менделеева, была не только причиной, но и стала своеобразной дорожной картой квантовой механики.

Электрон был открыт знаменитым английским физиком Дж. Дж. Томсоном. С помощью катодной трубки, состоящей из отрицательно заряженного катода. Если внутрь стеклянного сосуда запаять проводок и подать на него большой отрицательный заряд, а в противоположной стороне поставить положительно заряженную пластинку (анод), то подогревая катод можно получить поток зарядов с катода к аноду — увидеть это может каждый, поглядев внимательней на лампу дневного света. Явление это было непонятным, и физики считали этот поток неким волновым непрерывным заряженным ветром. Джозеф Джон Томсон догадался положить катодную трубку внутрь магнита и конденсатора, т. е. стал воздействовать на заряженный поток магнит-



Рис. 21
Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879)

ным и электрическим полями. Катодные лучи отклонялись магнитной силой Лоренца в магнитном поле в тысячи сильнее, чем ионы химических элементов. Напомню, что сила Лоренца, действующая на заряд в статическом магнитном поле, пропорциональна скорости заряда, умноженной на напряжённость магнитного поля. Поскольку ускорение обратно пропорционально массе, то очевидно отклонение будет определяться отношением заряда к массе катодных лучей — если это не лучи, а частицы. Но заряд протона и электрона — одинаков по модулю. Поэтому большое отклонение катодных лучей означало, что мы имеем дело с некими новыми в тысячу раз более лёгкими, чем атом водорода, частицами! Так в 1897 г. был открыт электрон.

«Джиджи» одним из первых предложил модель атома, в которой отрицательные заряды — электроны были окружены положительно заряженной сферой. Но модель эта была опровергнута его учеником — Резерфордом в той самой Кавендишской лаборатории. Эта неправильная модель Томсона представляет собой яркий научный результат, который полезнее, чем сотни скучных правильных работ, основанных на решении известных уравнений. Именно эта работа, заставила Резерфорда в 1908 г. проделать остроумный эксперимент по проверке строения атома. Он брал альфа-частицы (ядра гелия) и бил ими по тонкой золотой фольге.

Резерфорд считал, что в фольгу врезается положительно заряженная тяжелая частица с зарядом в два раза больше, чем у протона. Некоторые альфа-частицы пролетали через фольгу, абсолютно не замечая её. Какое расточительство — как будто это не золото, а простая медь. Ну, это шутка («*Не смешно*» — *Уффф*). Но иногда! Иногда, протоны возвращались практически обратно, будто наталкивались на массивную, абсолютно упругую стену! Резерфорд, открыв это странное явление, взял в руки авторучку и написал простенькую теорию стрельбы резиновыми пулями по очень крупной сетке. Смотрите, если сетка очень крупная — то 99 % пуль пролетит, не замечая её. Но стоит пуле попасть в узелок — как она отскочит практически в обратном направлении. Значит золотая фольга, сделанная из атомов золота, это огромное практически пустое пространство, в котором есть маленькие ядра с положительным зарядом. Притом, альфа-частицы попадая в ядро, отражались строго назад с той же скоростью — как от стенки! Значит узелки — ядра атомов золота — гораздо тяжелее альфа-частиц (ну это очевидно из таблицы Менделеева). В ядре атома золота огромное число протонов и они представляют для альфа-частицы абсолютно упругую стену. Теперь Резерфорд мог нарисовать атом самого простого и самого лёгкого химического элемента — водорода. В центре ядро — один протон — его размер порядка **10^{-13} см**, а сам атом в **100 000** раз больше. А плотность атома водорода равна практически плотности воды. Ведь вода состоит из атомов!

Но ядро золота, братцы — оно-то как? Как удержать огромное количество протонов — положительно заряженных частиц, между которыми действует огромная сила электрического отталкивания, в этих

сверх малых узелках? Значит, как-то они и притягиваются! Так в физику вошла третья сила — сила ядерного притяжения. Вот её называют сильным взаимодействием. Подобно электрической силе, ядерное взаимодействие определяется особыми зарядами присущими только нуклонам: протонам и нейтронам. Вот поэтому в ядрах атомов только они и содержатся. Самое маленькое ядро — ядро водорода имеет размер $R_я = 10^{-13}$ **см**. Отсюда можно посчитать плотность ядра $\rho_я \sim m_p/R_я^3 \sim 10^{15}$ **г/см**^{3}. (*«Да уж, такое в воде не поплывёт» — Уфф*). Протоны оказались немного легче нейтронов. Поэтому свободные нейтронам энергетически выгодно превратиться в протон. Но поскольку нейтрон нейтрален, то с положительно заряженным протоном должна родиться легкая отрицательно заряженная частица — электрон. Оказалось, что свободные нейтроны распадаются на три частицы: положительно заряженный протон, отрицательно заряженный электрон и электронное нейтрино:

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e.$$

Вот в этой реакции родилось ещё одно физическое взаимодействие — слабое взаимодействие. Его открыл Вольфганг Паули в 1934 г., пытаясь разобраться как раз с реакцией распада нейтрона. Эту реакцию физики называют реакцией бета-распада (буквой **β** физики обозначали электрон, а потоки электронов называли **β**-лучами). Так вот, наблюдая **β**-распад, они обнаружили нарушение закона сохранения энергии: суммарная энергия протона и электрона не была равна энергии нейтрона. Кто-то тайком уносил эту энергию «на сторону». Этого «несуна» физики пытались поймать почти 30 лет, и неслучайно так долго.

Вольфганг Паули сразу сказал, что частица эта практически неуловима, очень маленькая, без электрического, а тем более ядерного заряда, поэтому он и назвал её маленький нейтрон[48].

Квантовая механика: глаза боятся, а руки делают

Как-то один из создателей квантовой механики Вернер Гейзенберг поставил двойку студенту на экзамене за то, что тот на вопрос: понимает ли он квантовую механику, ответил — да. «Как же так, даже я её не понимаю», — объяснил Гейзенберг свое решение. Может быть это и анекдот, придуманный физиками, когда они ещё умели шутить. Но, если специальная теория относительности Эйнштейна была воспринята как глоток чистого воздуха, как порыв свежего ветра, согнавшего туман с противоречивой физической картины мира, то квантовая механика пробиралась в физическую картину мира подобно невидимой бацилле чумы. О нет, жители планеты почти ничего не замечали. А вот физики за несколько десятилетий заразились ею надолго и основательно. Причём эта коварная болезнь то и дело поражала самых первых её создателей, которые, не веря глазам своим, писали странные, абсурдные с точки зрения классической физики, уравнения.

Окончательно квантовая механика была сформулирована в 1925 г. немецкими физиками Борном, Гейзенбергом и Шрёдингером. Но начало процесса было заложено Максом Планком, который вовсе не собирал-

[48] Нейтрино, как и Чиполлино и Буратино имеют общее происхождение — на итальянском языке означает что-то маленькое.

ся совершать переворот во Вселенной. Если говорить строго, он вообще не руководствовался какой-либо физической идеей, а занимался подгонкой аналитической формулы к кривой спектра абсолютно чёрного тела.

После нескольких попыток он нашел правильную подгонку: количество энергии, излучаемой чёрным телом с температурой T на частоте ν равно:

$$r_{\nu T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

Всё бы ничего, хорошая формула. Но Планк не остановился на полпути, а ещё и вывел математически строго её. Правда, по дороге ему пришлось обрушить почти всё, что было дорого создателям классической физики. Ему пришлось предположить, что чёрное тело излучает свет не произвольными порциями, например, как режут охотничьим ножом колбасу на привале, а строго определёнными порциями — квантами — подобно специальному резаку в супермаркете. В результате, квантовая механика обрушила понятие пространства и времени, и как следствие — энергии и импульса, т. е. оснований физической картины мира. Здание это зашаталось так, что свои научные результаты Планк и Эйнштейн сопровождали постоянными оправданиями и извинениями, а иногда и гораздо более сильными словечками. Те же, кто пришел за ними — немецкие физики Гейзенберг и Шредингер — уже не переживали особых мук совести.

Согласно принципу Гейзенберга ни одно одновременное измерение координат и импульсов, или энергий и времени — не могло быть произведено со сколь угодной точностью. И произведение ошибок измерения всегда больше, чем некая постоянная Планка,

которая тому понадобилась, чтобы подогнать кривую спектра абсолютно чёрного тела:

$$\Delta E \Delta t \approx h \text{ или } \Delta x \Delta p \approx h ,$$

где $h = 6{,}67 \cdot 10^{-27}$ **эрг** $\cdot$ **с**. Посмотрите на эту константу! У неё даже размерность какая-то непонятная. Планк назвал её квантом «действия». Мы пока не будем объяснять что это такое, потому что штука эта очень плохо представимая, и, может быть, она нам и не понадобится. Ведь обходились мы без энтропии и ничего. («*Ну, недолго вам осталось...*» — *Уфф*).

Такое впечатление, что мир квантовой механики напоминает бильярдный стол, установленный рядом с камнедробилкой. Он постоянно трясётся и координаты шаров, которые вы прикидываете на глаз, изменяются с такой скоростью, что попасть в лузу абсолютно невозможно, а если и возможно, то никогда нельзя знать заранее (да и после — если в лузе дырка) в какую лузу вы попадёте!

В знаменитых лекциях по физике, в самом начале томика про квантовую механику, Ричард Фейнман предлагает найти классическое объяснение следующего эксперимента (рис. 22).

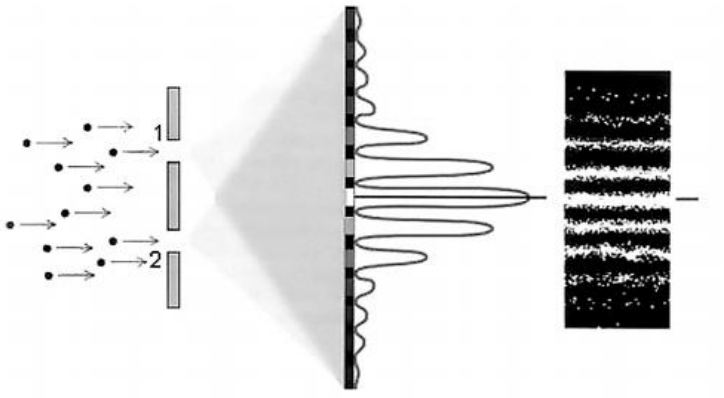


Рис.22

Электроны выскакивают из катодной трубки и попадают на непрозрачный экран с двумя щелями. За экраном расположена флуоресцентная поверхность, на которой происходит высвечивание прошедших через щели электронов. Так вот на экране появляется не чёткое изображение щелей, а некая интерференционная картина, как будто сквозь щели проходили электромагнитные волны света, а не частицы-шарики. Ричард Фейнман — замечательный учёный и Нобелевский лауреат, получивший премию за создание новой интерпретации квантовой механики, — предлагает читателю подумать и предложить объяснение этому опыту, используя классическую физику XIX в.[49]

---

[49] Не знаю, как другие, а я серьезно попытался это сделать, и вот что у меня получилось. Первое что надо сделать — это объяснить, почему пропали прямолинейные траектории электронов — и мы теперь даже не можем сказать, через какую щель, из двух, пролетел тот или иной электрон. Что же, это можно и сделать в классике. Представим себе, что электроны — это классические частицы — упругие шарики. Но пусть, кроме них, всё пространство наполнено другими — абсолютно невидимыми частицами. Тогда траектория каждого электрона превратится в случайную изломанную линию броуновского движения. Появляется неопределенность положения и скорости типа Гейзенберга. Я записал уравнение диффузии, ввёл плотность вероятности функции распределения электронов в пространстве координат и импульсов. Но вместо уравнения Гейзенберга получил обычное уравнение диффузии. Но я не сдавался и в уравнение диффузии для плотности вероятности руками ввел мнимый коэффициент диффузии, а саму плотность вероятности обозначил как произведение двух комплексно-сопряжённых функций (в квантовой механике они называются волновыми функциями частиц). Применив ещё одно условие, я получил уравнения квантовой механики Гейзенберга! Радости моей не было предела, но все-таки я понимал, что в классической физике нет такого явления как диффузия в мнимом пространстве! Так что и теперь у меня нет чёткого понимания квантовой механики.

Сделать это пока в рамках классической физики никому не удалось. А вот французский физик Луи де Бройль нашёл способ объяснить и дифракцию электронов, и постулаты Бора.

С Эйфелевой башни далеко видать

Собственно, был я на Эйфелевой башне всего-то раз. И не знал я, что в годы первой мировой войны на ней радистом служил Луи де Бройль — человек, который поправил самого Планка, да ещё и постулаты Бора объяснил. Уже после окончания войны он представил в Париже докторскую диссертацию «Исследования по квантовой теории», в которой сформулировал третью великую идею квантовой механики. Это была перевёрнутая идея Эйнштейна о том, что свет — частица. Де Бройль понял, что сами элементарные частицы являются одновременно и волнами. Тогда становится ясно, почему в мысленном эксперименте Фейнмана электроны проходят сквозь щели подобно волнам, образуя дифракционные полосы на экране.

Допустим, электрон представляет собой волну с длиной волны

$$\lambda_{\text{Бройля}} = h/mv.$$

В модели атома водорода Бора—Резерфорда, электроны двигаются вокруг положительно заряженного ядра — протона. Но у Луи де Бройля теперь есть собственная волна, а у волны длина волны и частота. А частота — это, считай, обратный пери-

од. Итак, у электрона есть некий период волны де Бройля. Чтобы волновая функция электрона не менялась после каждого оборота, число периодов волновой функции, укладывающихся вдоль его орбиты, должно целым:

$$2\pi R = n\,\lambda_{\text{Бройля}}.$$

Здесь n — целое число. Его называют главным квантовым числом электрона в атоме. Поскольку число n прыгает через единицу, то и орбиты атома водорода становятся дискретными. Другими словами, в планетарной системе атома водорода нельзя просто так запустить спутник на любую орбиту. У электронов в атоме не бывает високосных годов.

Вот вам и квантование орбит, вот вам и атом Бора с его спектральными линиями. Ну и что скажет читатель, просто один постулат заменили на другой постулат. Но в результате теперь можно точно посчитать энергию каждой орбиты. А каждая орбита — это уровень энергии атома водорода. Между уровнями происходит перескакивание электронов и излучение квантов света! Линейчатые спектры, которые уже почти 10 лет наблюдает Слайфер и обнаруживает разбегание Вселенной, становятся понятными. Тем не менее, парижские физики попытались отвергнуть диссертацию де Бройля. И тогда сам Эйнштейн заступился за неё. Благодаря этому заступничеству, о работе де Бройля узнал Шрёдингер, который через пару лет вывел волновые уравнения кантовой механики! Почему волновые? А какие же уравнения должны описывать поведение волны-частицы.

Как классическая физика получила неуд. Число N1

Приняв «к производству» квантовую механику, человечество пожертвовало самым дорогим, что у него было за душой — детерминизмом пространства и времени! Тела, населяющие наш мир, превратились в зыбкую рябь волнистых частиц. Теперь на вопрос: «Где моя деревня, где мой дом родной?» можно было ответить стихами поэта только с некоторой вероятностью[50]. Конечно, это не очень заметно глазу обывателя. Например, длина волны де Бройля свободного электрона при комнатной температуре в тысячу раз больше чем длина волны электрона на первой орбите в атоме водорода. А мы знаем, что длина этой орбиты порядка **10^{-8} см = 1 Å**. При комнатной температуре она в тысячи раз меньше миллиметра. А длина волны человека весом в 60 кг при той же скорости становится меньше Вселенной, когда её ещё не было.

Так что человечество ещё не осознало, чем ему пришлось заплатить за признание квантовой механики. За что же были принесены такие жертвы?

Тем не менее, можно абсолютно точно подсчитать, сколько мы потеряли и сколько приобрели за обрушение классической физики. Дело в том, что сама классическая физика XIX в., читай сами представления о природе перед началом XX в., содержала такие мины замедленного действия, что когда они рванули — мир перевернулся.

---

[50] Здесь я неуклюже цитирую стихотворение... «Вот моя деревня, вот мой дом родной» из учебника русского языка начальной школы.

В конце XIX в. нидерландский физик Хендрик (часто пишется Гендрик) Антон Лоренц, будущий лауреат Нобелевской премии, на основании теории Максвелла развил теорию излучения электромагнитных волн электрическими зарядами. Атома ещё не было, а вещество в своих теориях Лоренц представлял в виде диполей — положительного и отрицательного зарядов, колеблющихся относительно друг друга. Он показал, что излучать может только ускоренно движущийся заряд. При этом кинетическая энергия движения заряда переходила в энергию электромагнитной волны. «А почему равномерно движущийся электрон не может излучать?» — спросит пытливый читатель, и добавит: «Ведь у него тоже есть кинетическая энергия, и он может отдать её свету». В ответ на это, Зельдович обычно предлагал перейти в инерциальную систему отсчёта, связанную с электроном. В системе наблюдателя на электроне никакой кинетической энергии нет, и значит, нет и излучения. В общем, Лоренц абсолютно точно решил уравнения Максвелла и получил ответ, что заряд e, двигаясь с ускорением a, в единицу времени излучает энергию, пропорциональную квадрату ускорения:

$$L = (2/3)e^2a^2/c^3,$$

а я напомню, что уравнения Максвелла даже содержали внутри себя постулаты теории относительности, да и преобразования её называются преобразованиями Лоренца.

Когда появилась модель атома Бора, сразу же встал вопрос, звучащий строго математически — вопрос о существовании! Ведь электрон на орбите вокруг протона движется ускорено, причём его ускорение

определяет закон Кулона $a = e^2/m_eR^2$. Теперь подставим в эту формулу радиус первой орбиты[51] в атоме водорода из условия де Бройля $R = 10^{-8}$ **см**, массу электрона $m_e = 10^{-27}$ **г**, заряд $e = 4{,}7 \cdot 10^{-10}$ единиц **СГС**. Подсчитаем время, за которое электрон излучит свою кинетическую энергию:

$$t_{кл} \sim m_e v^2/2L \sim 10^{-8} \text{ с}.$$

Получается, что всего за одну стомиллионную долю секунды спутник протона — электрон — потеряет всю свою энергию и должен упасть на ядро. Значит, классическая физика отводит время жизни атому всего 10^{-8} с. Именно за это время электрон упадёт на протон и атом исчезнет, а вместе с ним и мы!

Чтобы понять степень кризиса физики XIX в., разделим время жизни Земли, которое можно положить порядка обратной постоянной Хаббла $T_н = 10^{18}$ **с**, на время жизни атомов, из которых она состоит:

$$N1 = (1/H_0)/t_{кл} \approx 10^{26}.$$

Когда студент физфака приходит сдавать физический практикум, и данные его эксперимента отличаются от истинных значений раза в 2, студент получает неуд. Какой же неуд получила классическая физика? Вот за эту бездну нулей и пришлось заплатить определенностью и порядком классического пространства-времени.

Но и профессионалам надо знать, что с их дедуктивным методом нужно быть осторожнее. Попробуйте

---

[51] Такую орбиту называют боровской. Но я решил вынести это в сноску, предвидя смех читателя-химика. Как физик, я никогда не обращал внимания на то, что химический элемент под номером 1 раскусил химический элемент под номером 5.

приложить квантовые законы к историям Конан Дойля, в которых герои — элементарные частицы. Как можно поймать убийцу, если его пребывание на месте преступления вероятно, потому что и само место преступления неопределено! А как быть с алиби? Были ли вы в 19–00 на перекрестке двух фотонов?

Композиция великой Джаз-банды в духе кубизма

Участники ленинградской Джаз-банды — Дау (Л. Д. Ландау), Димус (Д. Д. Иваненко) и Джо (Г. А. Гамов), много «репетировали», но оставили лишь одну — но зато какую! — совместную научную работу[52]. Это был своеобразный манифест, план, дорожная карта новой физики. Да, это была скорее импровизация в стиле Джаз. Ломая каноны и рамки приличий, перед вами разворачивается здание новой великой мечты — Теории Всего — в виде модного в начале века направления в живописи — кубизма. Причудливый магический куб великой Джаз-банды (рис. 23), по сторонам которого разбежались три великие физические постоянные[53] — c, G и h.

Да, фундаментальные физические постоянные больше не константы! Т. е. они конечно константы, но их значение может мысленно пробегать все возможные значения. В этом кубе помещались все от-

---

[52] О работе Гамова, Ландау, Иваненко читайте книгу Г. А. Сарданашвили «Дмитрий Иваненко — суперзвезда советской физики», Издательство URSS, Москва. https://phys.msu.ru/upload/iblock/815/Ivanenko-book.pdf

[53] Удобнее выбирать ось $1/c$ потому что в классической ньютоновской механике скорость света бесконечно велика и $1/c \to 0$.

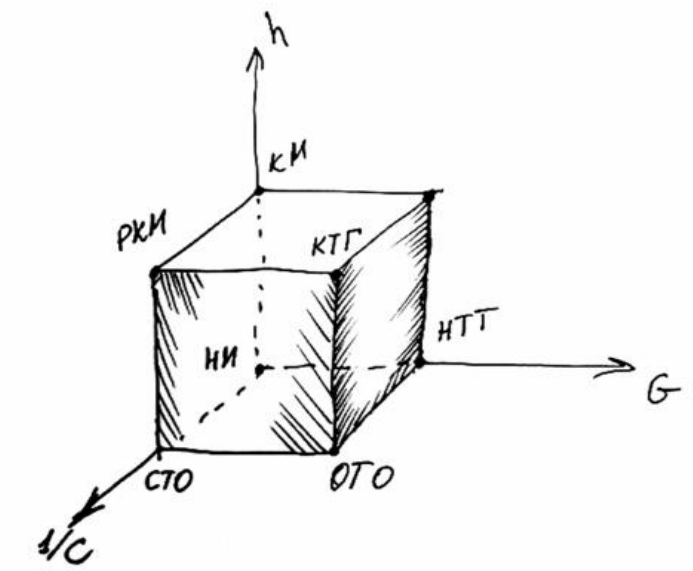


Рис.23. Одномерная Вселенная

крытые к тому времени физические теории. Если устремить постоянную тяготения и постоянную Планка к нулю — вы попадёте в царство специальной теории относительности — СТО. Это одно из рёбер куба $G = h = 0$. Можно устремить скорость света к бесконечности. Это эквивалентно $1/c \to 0$ и мы попадаем в ньютоновскую механику (НМ), в которой скорости складываются, как и 300 лет назад, и время везде течёт одинаково, и, внимание, магнитные поля вообще отсутствуют! Да, да именно так — магнитное поле это результат конечности скорости распространения электромагнитного поля! Добавим гравитацию — приземляемся на плоскость общей теории относительности (ОТО) — $h = 0$. Наоборот, избавляясь от гравитации ($G = 0$), попадаете на плоскую грань квантовой механики (КМ). Но магический куб предсказывает существование неоткрытой и совсем неизвестной — квантовой теории гравитации (КТГ).

Скажу сразу, до сих пор — спустя почти сто лет после написания этой композиции — куб не заполнен![54]

Но зато в физику вошли планковские единицы измерения. Ведь имея 3 константы разной размерности, можно всегда составить из них некую константу, например, размерностью грамм — это будет планковская масса m_{pl}. Также можно составить планковскую длину l_{pl}, планковское время t_{pl} и планковскую энергию E_{pl}:

единицу длины $l_{pl} = [hG/c^3]^{1/2}$,
единицу времени $t_{pl} = [hG/c^5]^{1/2}$ и
единицу массы $m_{pl} = [hc/G]^{1/2}$.

А также две новые единицы измерения — планковская плотность $\rho_{pl} = m_{pl}/l_{pl}^3$ и температура $kT_{pl} = m_{pl}c^2$ (k — постоянная Больцмана, связывающая температуру тела с кинетической энергией составляющих его частиц).

Это очень полезные единицы. Например, если мы хотим понять очень раннюю Вселенную с возрастом менее планковского времени, то мы должны признать, что без квантовой теории гравитации нам в этом никогда не разобраться. Поэтому такие времена уже давно называют сингулярными.

Особенно надо запомнить планковскую энергию и желательно в электрон-вольтах. Из школьного учебника известно, что энергия **1 эВ** — это энергия, которую приобретает электрон, проходя в электрическом поле разность потенциалов в **1 В**. Так вот, планковская энергия равна $\mathbf{10^{19}}$ **ГэВ**.

---

[54] Помню этот куб с 1974 г., когда нам — студентам МГУ — его рисовал замечательный советский космолог — Абрам Леонидович Зельманов. Лишь много позже я узнал, что куб этот придуман впервые великой Джаз-бандой.

Почему же мы назвали куб магическим? Куб обладает предсказательной силой: он предсказывает новую теорию — теорию квантовой гравитации. Но обратите внимание, магический куб кроме КТГ— других общих теорий не предсказывает! А вот здесь всё не так очевидно. Ведь если это признать, то «счастливый» конец физики близок! И квантовая гравитация будет последней общей физической теорией. Мы ведь не знаем других фундаментальных констант. Пока?!

Безразмерное мышление Поля Амадея Дирака

Не знаю, читал ли Дирак статью про магический куб, но в 1938 г. он опубликовал[55] свои размышления на тему фундаментальных констант. Дирак как один из творцов релятивистской квантовой механики, впервые построивший теорию релятивистского электрона, предложил несколько важных идей, которые повлияли на физическое мышление XX в.

Вот скажи, дорогой читатель, планета Земля большая или маленькая? Если вы, дорогой мой читатель, — муравей, то конечно она огромная, а если вы — разумное чёрное облако из романа Фреда Хойла, то не очень («*Хорошо излагаешь! Готовишь читателя к последней главе!*» — *Уфф*).[56] Понятно, что сколько

[55] P.A.M. Dirac (1937). The Cosmological Constants. Nature, vol. 139 p.323. DOI:10.1038/139323a0

[56] А если читатель бизнесмен, который потенциальный меценат научных исследований (иначе он бы и не взял эту книжку в руки), то ему вот такой пример. Встречаются два миллионера — один рублевый, а другой долларовый… кто круче? Понятно, что курс рубля это и есть отношение его стоимости к доллару — безразмерное число.

ни смотри на этот диаметр Земли из справочника по астрономии — не ответишь на этот вопрос. Почему? Потому, что километры — это единицы, придуманные человеком, и природа о них ничего не знает. А в природе значение имеют только безразмерные числа.

Вот на них Дирак и обратил внимание. Для характеристики слова «большое» нужно применять относительную, а не абсолютную меру великости. Например, разделим размер Земли на размер муравья... и т. д. Конечно, делить тоже надо с умом. И не отвечать на вопрос: «Кто сильнее — слон или кит?»

Вот пример Дирака, который мы уже использовали в нашей книге. Что сильнее электромагнитное взаимодействие или гравитационное? Дирак — человек из физики элементарных частиц, поэтому он не будет сравнивать, например, электрическое взаимодействие Земли и Луны с гравитационным. Он, конечно, будет сравнивать эти два взаимодействия у электрона и протона. «Давайте, — говорит Дирак, — разделим закон Кулона на закон всемирного тяготения Ньютона». Законы то похожи, а ответ неожиданный:

$$F_{эл} / F_{грав} = e^2 / Gm_p m_e \approx 10^{40}.$$

Это огромное число объясняет, почему вокруг нас почти все предметы, кроме автомобильных аккумуляторов, не заряжены. Как только, где-то, порой, что-то более или менее зарядится, тут же из-за огромности силы Кулона заряды противоположного знака притянутся и всё нейтрализуется. Именно из-за этого числа наша Вселенная оказалась электронейтральной. («*Но в розетку все равно не надо тыкать пальцами*» — *Уффф*.)

Или вот безразмерное число — количество протонов во Вселенной. Смотрите, плотность Вселенной близка к критической $\rho = 3H_0^2/8\pi G$. А размер Вселенной $R = c/H_0$ и объём, соответственно, $V = 4/3\pi R^3$. Перемножаем плотность на объём и делим на массу протона, которую впервые нащупал Дальтон:

$$N_p = c^3/GH_0m_p \approx 10^{80}.$$

Так и хочется извлечь корень квадратный и сказать, что он — корень — с огромной астрономической точностью будет равен отношению электрических и гравитационных констант! Но дальше встает вопрос. В число частиц, наряду с постоянной тяготения, входит и постоянная Хаббла. А постоянная то Хаббла вовсе не постоянная, подначивал американский физик Уокер, частично повторивший результаты Александра Фридмана для расширяющейся Вселенной. «И, следовательно, — воскликнул Дирак, — постоянная тяготения — переменна!» Вот вам пример неправильной работы, которая породила просто Ниагару статей, раздумий и споров на тему больших чисел. В конце XX в., когда стало ясно, что постоянная тяготения G никуда не меняется и за последние 10 млрд лет не изменилась ни на йоту, когда в физике элементарных частиц, кроме самих частиц ещё и появились более фундаментальные массы — массы тех же кварков или масса хиггсовского бозона. Кроме того, сами константы ядерного, электромагнитного и слабого взаимодействий сдвинулись с трона и поползли в теорию Великого Объединения. Поэтому в настоящий момент идеи Дирака сильно поблекли в умах теоретиков, хотя некоторые из них продолжают предлагать все более и более великие безразмерные числа.

Пятое колесо в телеге!

Итак, к середине XX в. физики осознали, что миром управляют четыре силы — гравитации, электромагнитные, сильного ядерного и слабого ядерного взаимодействий. Вообще-то, как-то это не хорошо. Вот, например, во времена Ньютона миром владела сила гравитации (не зря же тяготение — всемирное). При этом тяготение описывалось скалярным гравитационным полем (гравитационным потенциалом). В XIX в. Максвелл доказал, что электромагнитное поле — векторное. Дальше — хуже. Альберт Эйнштейн поправил Ньютона, и изгнал скалярное поле из физики вообще, заменив его на тензорное. А потом, как два удара по давно забитому гвоздю: ядерное и слабое взаимодействия, описание которых потребовало не только квантовой механики, но и новых физических полей. Атомы — кирпичики мироздания — стали распадаться на десятки элементарных частиц. Название всех элементарных частиц, наверное, не помнят даже лекторы по теоретической физике. Мир стал напоминать Лас Вегас, в котором десятки игроков и каждый играет за себя. Так может и вправду в мире царит хаос, а Господь Бог играет в кости?

Ну, нет — физики не сдавались. Собственно впереди здесь был человек, который обрушил классическую физику дважды — Альберт Эйнштейн. Да именно он повторял: «Я не верю, что Господь Бог играет в кости». После создания общей теории относительности он не стал размениваться и посвятил почти 30 лет своей жизни созданию теории ВСЕГО! То есть он верил, что существует такое волшебное уравнение, единственное и неповторимое, способное объединить весь мир!

Все взаимодействия, сразу и навсегда! Для начала он хотел бы объединить гравитационное и электромагнитное взаимодействия. Этот научный напор и его гигантский авторитет среди физиков, заставил многих из них двинуться на эту гору, которую стали называть Теория Великого Объединения. Хотя надо отметить, что все они вскоре пошли разными путями.

Восхождение продолжается до сих пор. В конце 60-х гг. забрезжил свет в конце тоннеля. Путеводной звездой здесь стала идея красоты. Да, именно, красоты. Не зря же Достоевский сказал («*Это кому?*» — *Уффф*), что красота спасёт мир. Собственно, красота особого склада, мы с Ууффом называем её туристической[57]. Люди восхищаются самоцветами, солнечными закатами и рассветами, морскими волнами, полыхающими в ночи языками костра или новогодней свечи. Красиво, замечательно, неповторимо, великолепно — слышны возгласы, завороженных каким-то чудом зрителей. А между тем, все эти явления, восхищающие совершенно разных людей объединяет одно общее свойство, все они содержат внутреннюю симметрию. С кристаллами самоцветов это очевидно. Возьмем плоскую аналогию — восьмиконечную звезду (рис. 24) («*Ну ты и дипломат*!» — *Уффф*):

Красивая звезда, напоминает снежинку. Но почему? Очень просто, есть строгий математический ответ. Неужели можно поверить красоту алгеброй? Можно, эту — можно! Повернём звезду на 45° (понаблюдаем при этом за точкой — воображаемой мушкой), и она опять станет сама собой. Физики бы сказали: восьмиконечная звезда не изменяется при

[57] О другой красоте мы поговорим в последней части книги.

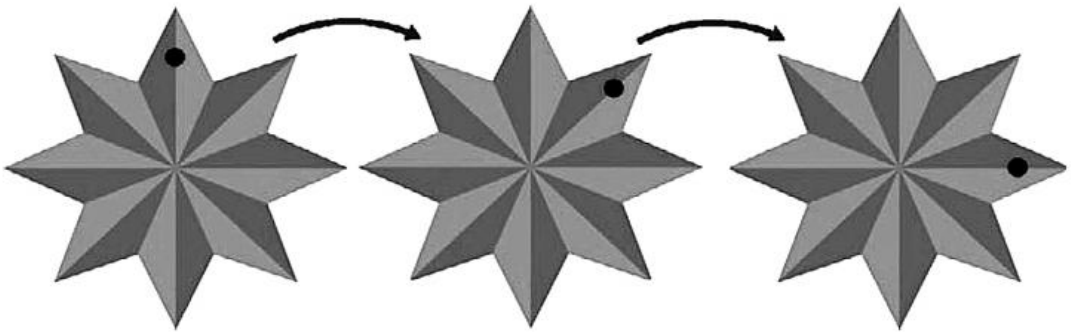


Рис. 24. Вращательная симметрия восьмиконечной звезды

вращении на 45°, или кратное ему число градусов! Сказали бы и сослались на математику — а именно специальную математическую теорию красоты. Она называется «теорией групп». Вращение — это преобразование углов. Группы — это группы произвольных преобразований, оставляющих какой-нибудь объект самим собой. Ну, это кристаллы — самоцветы, рубины и бриллианты, а как быть с рассветами-закатами и кострами? А здесь та же самая группа симметрии. Ведь что такое рассветы-закаты, колебания языков пламени (это волны в воздухе) да и морские волны?

Все эти явления содержат периодические колебания, которые описываются синусоидами. На рисунке 25 показано, что вращение по кругу полностью подобно распространению волны-синусоиды. А синусо-

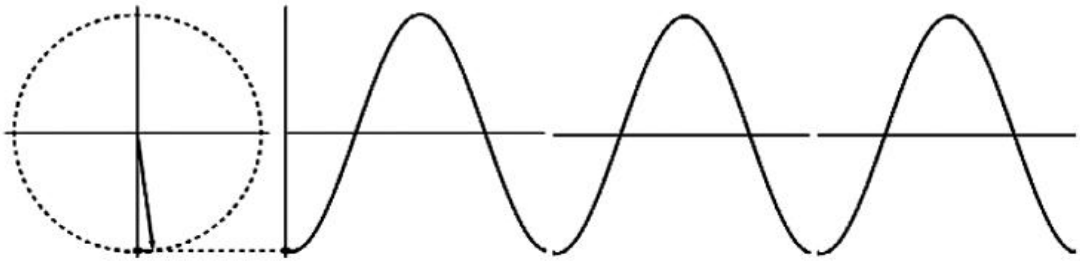


Рис. 25.

иды — это такие геометрические фигуры, которые при передвижении вдоль линии распространения переходят сами в себя, если сдвиг равен одному периоду или длине волны. Причём волна может распространяться и во времени, и в пространстве, да и в любых других сущностях. А ведь музыка — это тоже волна! Как говорил Пушкин: «Поверил я алгеброй гармонию». Да ведь в те времена ещё не было теории групп! («*Ай да Пушкин, ай да сукин сын*!» — **внутренний голос Пушкина**)[58].

Всякий закон сохранения в физике — это результат определённой симметрии нашего мира. Например, закон сохранения импульса, открытый ещё Галилеем (способность масс сохранять прямолинейное равномерное движение сколь угодно долго) — симметрия нашего пространства при параллельном сдвиге. Симметрия эта появляется в результате однородности пространства. А, например, фигуристка, складывая руки, убыстряет своё вращение благодаря закону сохранения момента вращения $\boldsymbol{mvR} = \mathbf{const}$. При этом $\boldsymbol{v} \sim \mathbf{1/}\boldsymbol{R}$, где $\boldsymbol{R}$ — длина рук. Так вот, момент вращения потому сохраняется, что пространство изотропно и есть вращательная группа симметрии.

Наконец, третий самый фундаментальный закон природы — закон сохранения энергии, можно рассматривать как постоянство при перемещении во времени. Таким образом, если что-то где-то

---

[58] Напомним, что говорил он это устами Сальери в «Маленьких трагедиях»:

...Я сделался ремесленник: перстам
Придал послушную, сухую беглость
И верность уху. Звуки умертвив,
Музыку я разъял, как труп.
Поверил я алгеброй гармонию...

(«*Порой*» — *Уффф*) сохраняется, то наверняка существует некая группа симметрии, подумали физики-элементарщики. Например, сохраняется электрический заряд. Сколько электрону не летать, сколько ему не излучать — ничего не происходит с его электрическим зарядом. Да и с массой покоя тоже! Напомним, что она равна «полмэва»! Вот полная масса изменяется в разных системах отсчёта, а масса покоя нет. Не стоит ли и за этими вещами какая-либо симметрия? Так идея симметрии стала стержневой в физике элементарных частиц.

Материя снова стала обретать кирпичики, правда это уже были не атомы и не барионы, а кварки и целые семейства частиц. В конце 60-х гг. удалось объединить электрическое и слабое взаимодействие, а потом к ним прибавить и ядерное. Так возникла Стандартная Модель — прообраз будущей теории Великого Объединения (рис. 26).

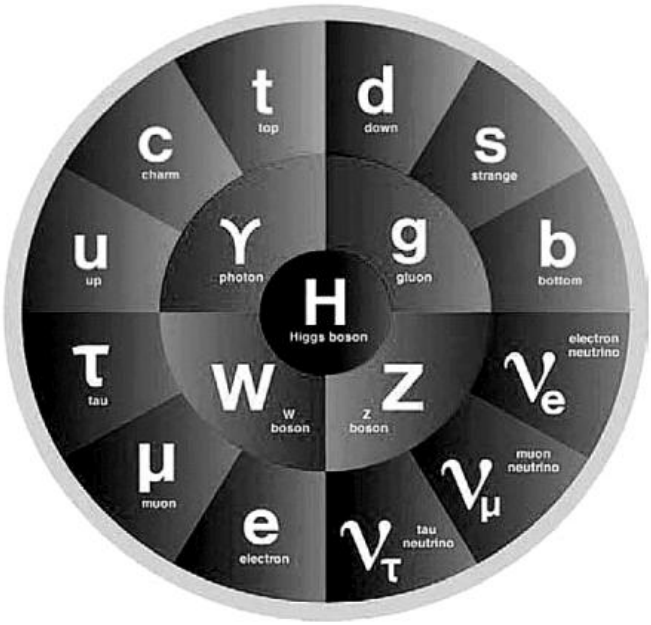


Рис. 26.

Оказалось, что это частное объединение стало возможным только после возвращения в наш мир скалярного поля![59]

В квантовой механике каждому взаимодействию соответствует своя частица — переносчик этого самого физического поля. Так квант электромагнитного поля это и есть сам световой квант. У слабого взаимодействия — нейтрино. У ядерного — глюон — частица с клееобразным названием. Глюон склеивает кварки. Наконец, у гравитационного — элементарным квантом будет не открытый ещё гравитон. Однако, откуда у элементарных частиц массы? Вот здесь как раз и понадобилось скалярное поле. В одной статье я нашел остроумную, но не стопроцентную классическую аналогию. Представьте себе, что на стеклянном столе лежат поролоновые почти невесомые шайбочки. Если дунет ветер, они тут разлетятся как бестелесные создания. А теперь представьте, что на столе разлито подсолнечное масло. Подуем снова: шайбочки движутся медленно, как будто они стали тяжелыми. Вот роль этого масла в природе играет скалярное поле Хиггса. А квантом этого поля является хиггсовский бозон с массой 115 ГэВ. Ну, это очень примерная аналогия, потому что пока частицы движутся равномерно, они не замечают скалярного поля и тут уж аналогия с маслом не работает.

Ну а теперь вернемся в нашу Вселенную («*Наконец-то*» — *Уффф!*). К нашим ложкам дёгтя.

---

[59] О бозоне Хиггса популярно написано в статье ведущего российского теоретика-элементарщика Валерия Рубакова: http://fb.ru/article/245315/prostyim-yazyikom-bozon-higgsa .

Инфляция Гута и месть Гука!

Теперь мы вооружены и квантовой механикой, и волшебным кубом.

Итак, Модель Вселенной (она тоже была Стандартной Космологической Моделью до 1980 г.) из первой главы не могла существовать. Мёд её горчил. Одна из-за четырёх ложек дёгтя — с двумя мы расправились. Хотя фотосфера Вселенной оказалась слишком гладкой — объекты возникают! Сначала в тёмном веществе. После просветления Вселенной очень быстро, гораздо быстрее, чем по формуле Лифшица, тёмное вещество затягивает гравитацией обычные барионы на себя. И к моменту $z = 10$ во Вселенной уже есть первые галактики и звёзды, а к моменту $z = 2 - 3$ почти все объекты сформировались и зажили своей, а иногда и совместно с соседями — жизнью[60].

Но не решен парадокс причинности — почему разные части Вселенной имеют одинаковую температуру, хотя в прошлом они никак не были связаны.

Алан Гут в 1980 г. первым понял, что скалярное поле, реабилитированное и возвращенное в лоно теоретической физики, может помочь решить этот парадокс, и более того, быть может, решить главный вопрос — почему Вселенная расширяется?

Возьмем скалярное поле и поместим его в наш любимый термостат с движущимся поршнем. Оказы-

[60] Вселенная тогда была в 3 раза меньше, а объём в 27 раз меньше, и в ней было тесновато. Можно сказать, некоторым жилось вполне привольно в своих квартирах, а некоторые ютились по коммуналкам. Речь идёт о галактиках. В коммуналках жизнь текла разнообразная, иногда случались столкновения. Таких соседей называют взаимодействующими галактиками.

вается, если начать выдвигать потихоньку поршень, то в некоторый момент обнаруживается, что поршень выдвигается сам по себе! При увеличении объёма поле начинает вести себя как обычная жидкость, но с отрицательным давлением $p = -u = -\rho c^2$, где по-прежнему u — плотность энергии, и ρ — просто плотность (да в граммах, да на кубических сантиметр) скалярного поля.

Ничего себе обычная жидкость. Ну да, жидкость эта, как бы, не совсем обычная. Обычно все-таки давление хоть и скачет, но отрицательным не бывает. А тут $-u$. Но отрицательное давление — это не так страшно. Вот если бы энергия стала отрицательной, тогда точно суши весла. Приплыли. А давление это все-таки сила на квадратный сантиметр. А сила может быть любая и положительная, и отрицательная. Тем более в гидродинамике такое иногда встречается. Например, если очень быстро вращать турбину в потоке воды, то на её краях начинают образовываться пузырьки — их называют кавитационные пустоты — вот у них на стенках давление точно отрицательно — иначе бы пузырьки схлопнулись. Эти пузырьки небезопасные — они разрушают лопасти турбин. Но всё-таки, аналогия не прямая. Во вселенной скалярное поле не просто разлито по стаканам, а разлито в гравитационном поле, и полная гравитирующая масса складывается из собственно энергии u плюс утроенное давление — $3p$. Пока давление положительно — всё понятно, ведь давление это сила, а сила это изменение импульса в единицу времени, а, собственно, это же и есть кинетическая энергия теплового движения. Эб этом нам рассказывал велосипедист Петя, когда подкачивал сдувшиеся

шины и обжигался о насос. Давление — это энергия. Поэтому давление тоже весит!

Термодинамику никто не отменял, запишем первое её начало: $\Delta U = -p\Delta V = u\Delta V$. Но $U = uV$, значит $u\Delta V + V\Delta u = u\Delta V$. Сокращаем в левой и правой части одинаковые члены и получаем замечательный результат $\Delta u = 0$. Плотность энергии постоянна! Смотрите, при расширении Вселенной полная энергия её растёт, а в одном кубическом сантиметре, никак не изменяется. Точно как стипендия во время денежной инфляции. Так значит, во Вселенной в начале расширения была безработица и инфляция («*Безработица точно, в том смысле, что рабочих мест не было*», — *Уффф, — Впрочем, как и рабочих!*») Но в отличие от нашей жизни, инфляция в космологии оказалась очень полезной.

Давайте, как раньше, вырежем в расширяющейся Вселенной, заполненной скалярным полем, маленький шарик и положим на его поверхность пробное тело единичной массы. Тогда по второму закону Ньютона сила, действующая на пробное тело, будет одновременно ускорением ($F = ma = a$, при $m = 1$):

$$F = -GM/R^2 = -4/3\ \pi G\rho_т R,$$

где $\rho_т$ — полная тяготеющая плотность шара. Она складывается, соответственно, из плотности скалярного поля $\rho_ф = u_{инф}/c^2$ и трех давлений $\rho_p = 3p/c^2$. Почему трёх, мы уже знаем — ведь пространство наше трехмерно и давит на три стороны. Поэтому давление в три раза меньше плотности кинетической энергии и равно $-u_{инф}$ и, следовательно, тяготеющая плотность равна $\rho_т = u/c^2 - 3u/c^2 = -2u/c^2$. Сила тяготения, действующая во время инфляции, оказывается равной

$$F = +(8/3)\pi G\rho_{\varphi} R = kR.$$

Сила поменяла знак! Притяжение сменилось на отталкивание, а гравитация на антигравитацию! Да ещё посмотрите, сила прямо пропорциональна расстоянию! Это же чистый закон Гука. Только с обратным знаком. («*Вот именно*!» — *Уффф*). Вспомним, что в настоящем законе Гука в этой формуле минус и он описывает колебания пружинки, после того как её дёрнули. А колебания — это движение по закону синуса или косинуса с круговой частотой $\omega = 2\pi/T$. Колебания маятника удобно описывать с помощью мнимых чисел: $R = R_0\, e^{i\omega t}$ — расстояние пружинки от точки равновесия. Кстати, ωt — это угол. Положим его равным π радиан. Это полпериода. А мы знаем, что через полпериода маятник отклонится в обратную сторону ровно на амплитуду колебаний. Т. е. $R = -R_0$. В результате получается знаменитая формула Эйлера $e^{i\pi} = -1$, выведенная Леонардом Эйлером в Санкт-Петебрурге. Замечательно, что частота колебаний маятника или пружинки весом **1 г** — это корень квадратный из коэффициента Гука, взятый с обратным знаком $-k$. Но у нас-то сила поменяла знак, и движение получается совсем не похожее на колебания пружинки! В нашем случае коэффициент Гука положителен, а корень из $-k$, соответственно, содержит мнимую единицу, за которую итальянский математик Кардано побил её автора, а Леонард Эйлер воздал ей должное в своей великой формуле. В результате закон расширения Вселенной на стадии инфляции оказался экспоненциальным!

$$R = R_0\, e^{H_{\text{инф}} t}.$$

Смотрите, если сила растёт с расстоянием, то и ускорение растёт с расстоянием. Получается геометрическая прогрессия: за равные промежутки времени радиус шарика увеличивается в одно и то же количество раз. Закон расширения Вселенной поменялся! Теперь она не просто расширяется, а просто раздувается! Её размеры растут как число зёрен на шахматной доске из восточной притчи про богача и крестьянина[61]. При этом возникает постоянная, имеющая такую же размерность, как и настоящая постоянная Хаббла — обратное время Хаббла

$$H_{\text{инф}} = \sqrt{8\pi G\,\rho_{\varphi} / 3}.$$

Только во время инфляции постоянная Хаббла и в самом деле постоянна и не зависит от времени!

Вспомним про вторую ложку дёгтя. Она превращается в мёд! Действительно, как выглядит инфляционная экспонента в самом начале при $t \to 0$? Вначале экспонента некоторое время $t << 1 / H_{\text{инф}}$ топчется на месте (её радиус остаётся равным R_0), и за это время, пока она топчется, зона причинной связанности линейно растёт $R_{пс} = ct$ (рис. 27).

Начальный радиус всегда можно выбрать таким, чтобы $ct > R_0$. В этот период Вселенная оповещается о температуре и выглаживаются все неровности, так

---

[61] Есть и другая версия. Создатель шахмат древнеиндийский математик Дравид Веллар попросил у короля, которому понравилась игра, награду в виде пшеничных зерен: пусть король в первый квадрат положит одно зерно, во второй 2, в третий 4 и т. д. Сумма этой геометрической прогрессии равна $2^{64} - 1 \approx 2 \cdot 10^{19}$ штук. Такого количества пшена человечество ещё не собрало.

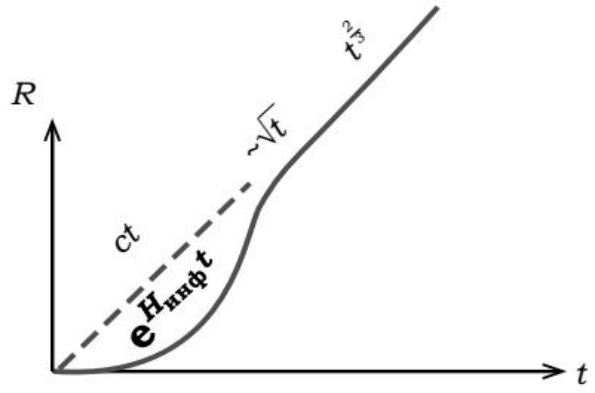


Рис. 27. Инфляционная экспонента

что в раздувшейся Вселенной везде температура теперь $T = 2,7$ К с точностью до четвёртого знака.

Если выразить плотность скалярного поля из постоянной Хаббла во время инфляции, то получится формула, в точности совпадающая с критической плотностью Вселенной при движении со второй космической скоростью:

$$\rho_{\varphi} = 3H^2_{инф} / 8\pi G.$$

А не это ли разгадка механизма тонкой настройки «файн тюнинга», — воскликнул Алан Гут, на языке автомобильной прокачки?

Действительно, давайте, как и раньше, вырежем из Вселенной маленький шарик и запишем закон сохранения полной энергии пробного тела весом 1 г на его поверхности. Кинетическая энергия тела весом 1 г равна $K = v^2/2$. А гравитационная (на самом деле антигравитационная) теперь будет уже считаться по формуле потенциальной энергии пружинки, но с обратным знаком $U = -kx^2/2 = (8/3)\pi G\rho_{\varphi} R^2/2$. В процессе расширения их сумма остаётся всё время постоянной:

$$K + U = v^2/2 - (4/3)\pi G R^2 \rho_{\varphi} = \text{const}.$$

Но вспомним, что в любой момент времени $v = HR$, а критическая плотность $\rho_{крит} = 3H^2/8\pi G$. Закон сохранения энергии перепишем так:

$$1/2\ H^2 - 4/3\ \pi\ G\ \rho = \text{const}/\ R^2.$$

Ну и последний удар *Ууффа* — делим это уравнение на $4/3\ \pi G\rho$ и вспоминаем, что $\Omega = \rho/\ \rho_{крит}$:

$$\Omega \sim 1 + \text{const}/R^2\rho \sim 1 + e^{-2Ht} \to 1.$$

Вот и третья ложка (Парадокс N3 «фридмановской модели») дёгтя уничтожена! Так как на стадии инфляции плотность остаётся постоянной, а радиус Вселенной растёт экспоненциально, то отличие значения от единицы исчезает экспоненциально! Вот и разгадка тонкой настройки.

Инфляция, стреляли?

У сибирских охотников есть одно развлечение. В раннюю сибирскую осень, когда ещё тепло и листва кое-где держится, вдруг подует ветер с Таймыра, и в течение нескольких часов ударит мороз под тридцать. Вода настолько чистая, что не замерзает — не знает с какого места образовать первые кристаллы! Достанет охотник ружьишко да и пальнет в синее небо, и вмиг всё озеро покрывается льдом. Звук выстрела встряхивает поверхность озера, и она становится не изотропной. Происходит фазовый переход — превращение переохлажденной жидкости в твёрдое тело. Итак, вода сибирского озера — она как Вселенная — однородная и изотропная. Она бы

и рада превратиться в лёд да не знает, с какого места это сделать, хотя температура её далеко за минус. Нужен центр кристаллизации! Нужны кое-какие возмущения — загогулины в воде. Обычно с этим проблем нет. В густонаселённой европейской части России полно пыли и аэрозоли, которые, попадая в воду, служат центрами кристаллизации — тут и стрелять не надо. А вот вдали, в тайге, на сибирских бескрайних просторах, в затерянных озерах такое возможно. Процесс превращения воды в лёд физики называют фазовым переходом и добавляют первого рода. Здесь фаза — не электрическая, а от фазового состояния вещества. Жидкая фаза переходит в твёрдую. Ясно, что раз стреляли, значит, процесс скачкообразный — плотность, объём и скорость их изменения со временем меняются скачком. Такие фазовые переходы в физике называются переходами первого рода. Обратите внимание, что при фазовом переходе в озере нарушается внутренняя симметрия. Если вначале у вас была однородная вода, то теперь появились кристаллики, а кристаллики, вы знаете, имеют грани и выделенные направления. Конечно, для любого охотника что вода, что лёд — вещи относительно изотропные и однородные, а вот молекулам воды уже не пошевелишься особо в некоторых направлениях — мешают ребра кристаллов. Но если симметрия нарушается, то какая-то физическая постоянная перестает быть постоянной, подумал Хиггс, и понял что постоянная масса покоя элементарных частиц при нарушении симметрии перестаёт быть постоянной. Надо только найти такую жидкость и пострелять там! Так родилась идея объяснить появление масс элементарных частиц, в результате разрушения

симметрии во время фазового перехода в скалярном поле, квантом которого является хиггсовский бозон. Действительно, нарушение симметрии при фазовом переходе может привести к нарушению сохранения, например, массы покоя элементарных частиц. Например, из нулевой она может стать конечной.

Однако масса хиггсовского бозона **115 ГэВ** бесконечно далека от Планковской массы $\mathbf{10^{19}}$ **ГэВ**. Породить массы элементарных частиц хиггсовское скалярное поле может, а вот обеспечить раздувание Вселенной — нет. Ведь мы стартуем с планковских размеров и с планковских энергий, а энергия скалярного поля определяет нам характерное время увеличения вселенной в **e** раз, которое в свою очередь обратно пропорционально квадратному корню из плотности энергии скалярного поля: $t = 1/H_{инф} \sim 1/\sqrt{U}$. В современной модели инфляции считается, что она происходит за счёт одного из самых сильных скалярных полей, которых в современной стандартной модели может быть великое множество.

Посмотрим, как теперь выглядит история нашей Вселенной. Всё ли в ней в порядке и нет ли где ещё каких-нибудь загогулин. Вспоминая магический куб джаз-банды, мы понимаем, что пока мы не открыли теорию квантовой гравитации, очень близко к началу подходить нельзя. Отойдём от него на расстояние в несколько планковских времён и длин. Хотя понятно, что и тут у нас знаний не совсем хватает, но здесь уже можно работать с разными моделями. Как только родился начальный «шарик» радиусом $R_0 > 10^{-33}$ см. Было тогда Вселенной отроду 10^{-43} секунды, ну или чуток побольше. В момент рождения Вселенной плотность ρ и температура T вещества достигали планковских значений:

$\rho_{pl} \approx 10^{93}$ г/см^3, $T_{pl} \approx 1{,}3 \cdot 10^{32}$ К. Плотности энергии там настолько велики, что физические взаимодействия объединены в одно однородное инфляционное скалярное поле. Нет ни частиц, ни ядерных взаимодействий, ни слабых, ни электрических полей. А одно лишь скалярное поле. Конечно оно однородное только в первом приближении. Квантовая механика здесь как никогда в силе, и Вселенную потряхивают квантовые флуктуации. Эта рябь, когда-то сильно позже превратится в галактики и звёзды. Но в процессе раздувания рябь как бы замерзает, ведь и сама плотность Вселенной не меняется. Здесь хотелось бы ради красного словца сказать, что флуктуации во Вселенной замерзают как озера в тайге после выстрела! Ведь в своей осеменяющей работе Алан Гут действительно считал, что в ранней Вселенной происходил фазовый переход первого рода, подобно образованию льда в переохлажденной воде. Но выпускник МГУ Андрей Линде очень быстро показал, что инфляцию правильно устраивать за счет фазового перехода, не первого, а второго рода. Более плавно, как говорят физики скалярное поле скатывалось к нулю по параболе (рис. 28).

При плавном переходе во Вселенной не рождались гигантские неоднородности, и Вселенная получалась не ребристой, как кристалл льда. Так что в эпоху инфляции не надо было бояться человека с ружьём. («*Ну ты и завернул ради красного словца*» — *Уффф*). Да, да! Здесь я процитировал фразу из когда-то знаменитого советского фильма «Человек с ружьем»[62]. Но это

[62] Фраза приписывается руководителю другой революции — не физической — Ульянову-Ленину. Но в полном соответствии с теоремой Арнольда (читай дальше) автором её является простая финляндская крестьянка.

Инфляция и Скалярное Поле

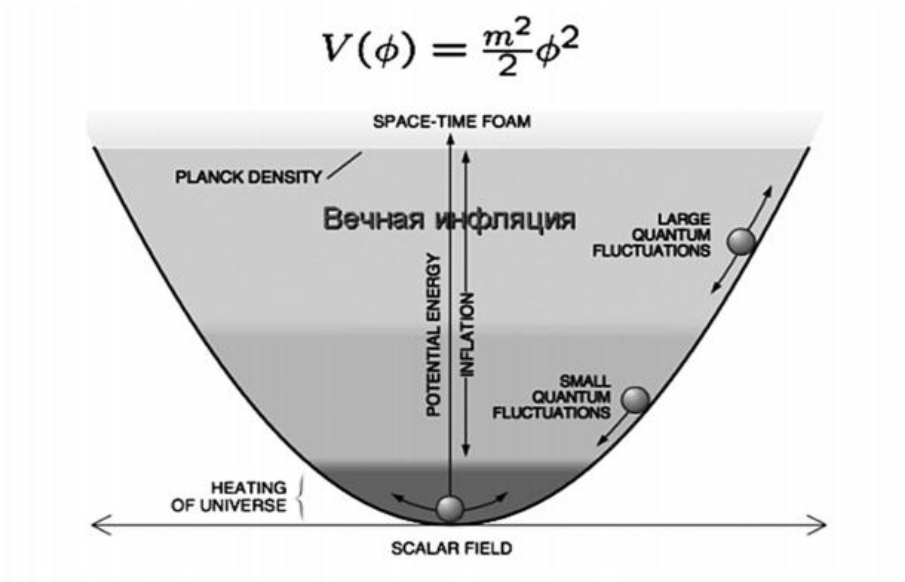


Рис. 23.

не просто красное словцо. Дело в том, что в нелинейных системах, а социум людей очень нелинейная система, иногда происходят бифуркации подобно фазовым переходам в физике. Немецкий физик Герман Хакен придумал целую науку (которую не все принимают как отдельный раздел физики) синергетику, в которой некоторые физические, химические и политические явления описываются одинаковыми нелинейными математическими уравнениями. То есть Октябрьская революция — это тоже фазовый переход. Таким образом, инфляция Линде точно прошла мирно, и он мог воскликнуть вслед за героем советского режиссера Сергея Юткевича: «Теперь не надо бояться человека с ружьём!».

Фаза инфляции тянулась примерно **70—100** времён инфляции — $\boldsymbol{t_{инф} = (70—100)1/H_{инф}}$. Для простоты положим $\boldsymbol{100/H_{инф}}$. За это время Вселенная с план-

ковских размеров $l_{pl} \sim 10^{-33}$ **см** раздулась в 10^{43} раз, и её радиус стал $10^{43} \cdot 10^{-33} = 10^{10}$ **см**, после чего она «села» на радиационно-доминированную фазу и расширялась по старому доброму закону пьяного человека, блуждающего в лесу. Так разрешается парадокс причинности — маленькая причинно связанная Вселенная охватила всё до современного горизонта и на много порядков дальше.

Вселенная может стать больше наблюдаемой нами Вселенной на много порядков! Действительно, размер горизонта нашей Вселенной — это $c/H_0 \sim 10^{28}$ **см**. Надо возвести эту величину в куб, чтобы понять, что энергия и масса Вселенной увеличились в огромное количество раз — в 10^{30}. «Да это же прямое нарушение закона сохранения энергии и вечный двигатель в виде бесконечного насоса» — воскликнула бы парижская академия наук, если бы Алан Гут доложил ей свою модель инфляции в XIX в. Но постойте, ведь мы вывели закон роста энергии при расширении вещества уравнением $p = -u$ именно из первого начала термодинамики! То есть мы ничего не нарушали. Фокус состоит в том, что полная энергия сохраняется, а она складывается из потенциальной энергии тяготения и энергии скалярного поля. Более того, эта полная энергия вполне могла быть равна и нулю! Вас же не удивляет, что полная энергия первого космического спутника, запущенного в СССР, была вообще отрицательной («*А это уже смахивает на донос в прокуратору. Куда же пошли советские рублики?*» — *Уффф*).

Итак, с энергией все в порядке. Просто сила гравитации теперь стала силой антигравитации и потенциальная антигравитационная энергия как всегда отри-

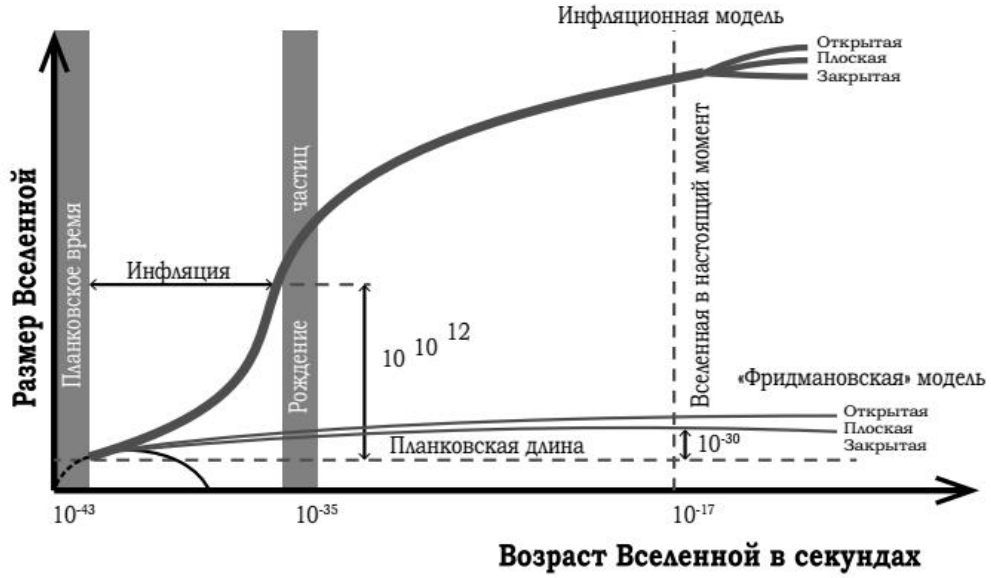


Рис. 29 Инфляционная Вселенная

цательна, но падает при раздувании шарика на бесконечность. И у нас как в пружинке Гука, только знак другой: $U \sim -kx^2/2$. Соответственно полная энергия $v^2/2 + U = \text{const}$.

Через 100—1000 планковских времён инфляция-фазовый переход заканчивается, и скалярное поле передаёт всю свою энергию народившимся элементарным частицам. Отметим, что все они безмассовые — как фотоны — мечутся по Вселенной со скоростью света, и давление становится положительным как у фотонного газа $p = u/3$. А и это есть наша радиационно-доминированная стадия. А теперь вспомним, что Стандартная Модель предсказывала многочисленные скалярные поля, которые то и дело будут проявлять себя, разрушая те или иные симметрии в природе. В какой-то момент настанет время хиггсовского бозона с его скалярным

полем, и частицы обретут, наконец, инертную массу покоя.

Замечательно, что новая огромная Вселенная родилась из первичного причинно-связанного шарика и теперь фотоны уже знают свой манёвр, и к моменту просветления по всей Вселенной будет ровно 2,7 К.

Заодно инфляция объясняет, почему плотность современной Вселенной равна единице и решает проблему тонкой настройки. Поскольку наша видимая Вселенная, в которой расстояние 13 млрд световых лет — лишь маленький кусочек огромного мира, то и пространство его кажется плоским, как у Эвклида. А плоское пространство в общей теории относительности может быть только у Вселенной с критической плотностью **Ω =1.**

Кстати, велосипедист Петя — это замечательный пример равновесия системы, у которой много загадок. Ведь с точки зрения потенциальной энергии, лучше Пете лежать на Земле, а не сидеть на велосипеде. Однако он почти никогда не падает. Конечно, ему помогает закон сохранения вращательного момента, колеса крутятся и поддерживают Петю в вертикальной плоскости. Но ведь мы знаем, что велосипедист может даже стоять на месте. Правда он при этом получается какой-то дёрганый. Всё дело в том, что дерганый велосипедист имеет две равновесных точки — одна на Земле, а другая — на велосипеде. Кстати, каждый может проверить явление с помощью бильярдного кия: можно взять кий на указательный палец и, слегка подёргивая, держать его в невыгодном, с точки зрения энергии, положении. Вы замечали, что чем медленнее едет велосипедист, тем сильнее он дергает рулём туда-сюда?

Принцип Арнольда или кто придумал инфляцию?

Есть замечательная теорема известного советского и российского математика Владимира Игоревича Арнольда. Она формулируется так: всякое открытое явление не носит имя первооткрывателя. Например, Америка не называется Колумбией, а закон Архимеда открыл вовсе не Архимед. Да и название самой теоремы Арнольда подтверждает её правильность — ведь сформулировал её английский физик Майкл Берри.

А инфляция Алана Гута тоже кем открыта?

Помню один доклад Алексея Александровича Старобинского на семинаре Я. Б. Зельдовича за два года до появления статьи Гута в 1979 г., в которой он как раз говорил о некоем начальном состоянии Вселенной, из которого она произошла. Это была попытка проквантовать Вселенную в той части магического Джаз-куба Гамова, Иваненко и Ландау, куда нельзя ходить без ружья. Там опасно. Там теория Эйнштейна перестаёт работать, а квантовая механика так трясёт Вселенную, что её размер-то и определить нельзя из-за неравенства Гейзенберга. Согласно модели Старобинского, вначале Вселенная находилась в некотором вакуумно-подобном состоянии, уравнением этого состояния было $p = -u$! Работа Старобинского вмиг стала популярной в Советском Союзе. И не зря, позже Старобинский совместно с Вячеславом Мухановым и Геннадием Чибисовым и получили престижную премию по космологии.

Однако ещё за 5 лет до появления слова «инфляция» в космологии, Эраст Борисович Глинер вместе со своей аспиранткой Ириной Дымниковой опубликова-

ли в советском журнале «Письма в Астрономический Журнал» статью с моделью возникновения Вселенной путем экспоненциального расширения за счёт «некоего вакуумного поля с отрицательным давлением»! Да, там не было слов о скалярных полях, но все формулы, все главные парадоксы Вселенной разрешались точно так же, как в модели Алана Гута. Откуда они взяли такое чудно́е вещество в 1975 г.? Ведь никто ещё не знал тогда об удивительном свойстве скалярных полей?! Оказывается, за 10 лет до этого, в 1965 г. Эраст Глинер обнаружил, что в общей теории относительности давно присутствует такое вещество и называется оно космологическая постоянная!

Но если вы думаете, что Глинер был первым — вы ошибаетесь! Недавно в журнале «Nature» была опубликована фотография салфетки, на которой Альберт Эйнштейн впервые, совершив и поправив несколько арифметических ошибок, вывел в три строчки, что его знаменитый λ-член в уравнениях общей теории относительности действует ровно таким же образом, как некоторое физическое поле с отрицательным давлением $\boldsymbol{p = -u}$! Понятно, что формулы на салфетках — это не шансон, и пока за них Нобелевские премии не дают, да и со статьями или монографиями не равняют[63]. Но всё-таки, именно это уравнение состояния позволило космологам впервые объяснить, почему наша Вселенная именно такая, а не иная.

В середине 70-х гг. Лев Эммануилович Гуревич высказал мысль, что причиной Большого Взрыва было некое физическое вещество с отрицательным давле-

[63] Нобелевская премия по литературе за 2016 г. была присуждена автору и исполнителю Бобу Дилану.

нием! Но и он узнал об этом веществе из работы своего коллеги по Ленинградскому физико-техническому институту Эраста Борисовича Глинера. Вот без работы Глинера, имя которого зачастую авторы инфляции обходят молчанием, сама теория могла бы и не появиться. Хотя...

На самом деле, впервые идею о том, что действие положительной космологической постоянной подобно присутствию физического поля с уравнением состояния $p = -u$, опубликовал Фред Хойл, но это уже следующая история, в которой разрешится последний парадокс «фридмановской» модели Вселенной — парадокс молодой Вселенной.

Теория пустоты

Природа не терпит пустоты. Если откачать напрочь всё из сосуда, то в нём всё равно что-то останется. Это что-то, неоткачиваемое в принципе, назвали эфиром. Но впервые вопрос на физическом уровне о том, из чего состоит пустота, был поднят в XIX в. Хендриком Лоренцем — создателем электронной теории взаимодействия вещества с электромагнитными волнами. Распространение света в веществе он описал, предположив, что вещество содержит макроскопические электрические заряды — осцилляторы. Но его смущало то, что согласно теории Максвелла, свет может распространяться в абсолютной пустоте. Как же так? Ведь свет — это электромагнитные волны. Но волны всегда распространяются в чём-то. Например, волны на море — они в воде (хоть и на поверхности), звук — тоже волны — распространяется в воздухе, а в пустоте исчезает. Быть может, и пустота вовсе не пу-

стота и что-то да в ней есть? Но что это за сущность, которая является пустотой кромешной? И физики придумали новую сущность — эфир. Да, тот самый эфир, бедный, многострадальный, впоследствии заклеймённый физикой XX в., изгнанный, казалось, навсегда Эйнштейном и его принципами относительности. Хорошо, предположил Лоренц, давайте возьмём сверхмощный насос, откачаем из некоторого объёма весь воздух, вокруг обернём фольгой, чтобы внутрь не проникали никакие электрические и магнитные поля, запустим туда свет и проверим, есть ли сопротивление эфира? Конечно, шёл XIX в., и эфир заполнял всю неподвижную Вселенную, располагаясь в абсолютной неподвижной системе отсчёта. Английские физики Майкельсон и Морли попытались найти сопротивление эфира свету. Для этого Майкельсон предложил использовать один из самых важных инструментов исследования природы последних ста лет — интерферометр. На рисунке 30 показана принципиальная схема интерферометра[64].

Фокус состоит в том, что луч света расщепляется специальной полуотражающей пластинкой, расположенной в центре под углом 45° к исходному лучу. Конечно, вы теряете при этом мощность светового потока, но зато получаете из одной две абсолютно одинаковые электромагнитные волны. Отразившись от неподвижных зеркал, обе волны направляются в детектор. Если длина плеч (два взаимно-перпендикулярных рукава, протянутых до неподвижных

[64] 14 сентября 2015 г. два самых больших интерферометра в мире в Хэнфорде и Луизиане (США) впервые зафиксировали гравитационные волны.

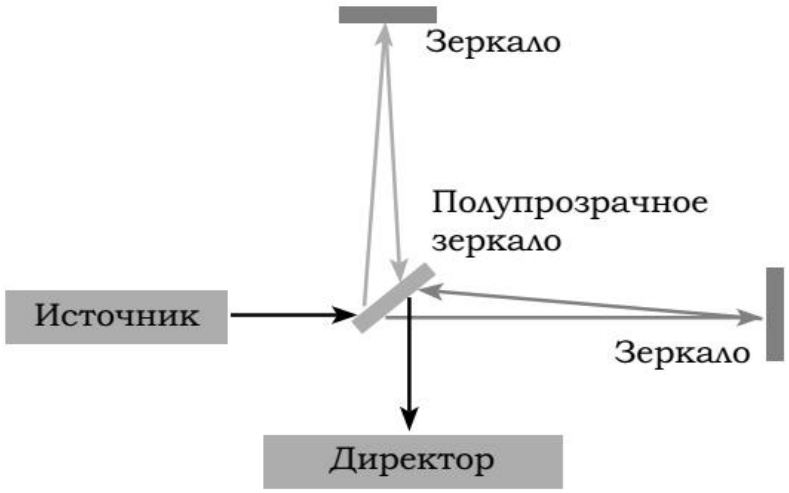


Рис. 30

зеркал) одинакова, волны придут в одинаковой фазе и сложатся — будет светлое пятно на детекторе. Если теперь плавно увеличивать одно из плеч, то и соответствующий луч начнёт приходить позже. В момент, когда разность путей достигнет половины длины волны, на детекторе появится тёмное пятно. Правда, в эксперименте Майкельсона и Морли плечи оставались постоянными, а весь интерферометр вертелся, как на сеансе чёрной магии.

Однако, никто не вертел столами. Известно, что Земля движется по орбите вокруг Солнца с очень удобной скоростью 30 км/с[65], а свет летает в 10 000 раз быстрее. Максимальная разность хода лучей в плечах будет равна $(1/(c + v)) - (1/(c - v))$. Каждые полгода направление скорости движения Земли будет изменяться (по отношению к эфиру) на противоположное (рис. 31).

[65] Точнее 29 км/с . Уточнение я делаю для тех, кто хочет запустить космический аппарат на Марс.

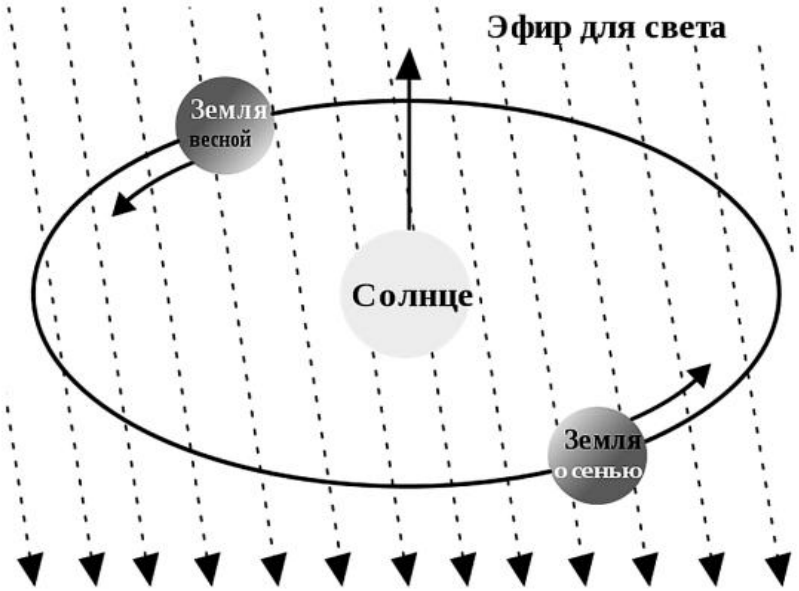


Рис. 31

Если эфир не увлекается Землёй, то скорость должна изменяться, а изменение длины хода лучей должно быть пропорционально $2l(v/c)^2 = 10^{-8}$.

Сначала (например, ранней осенью) вертикальное плечо было вдоль орбитального движения Земли, зимой — поперёк, меняясь местами со вторым плечом, и весной, наконец, становилось противоположно. Если бы эфир как-то притормаживал свет, то белое пятно на детекторе обязательно превратилось бы в чёрное или, по крайней мере, поменяло бы свою яркость. Но сколько стол «ни вращали» — ничего не происходило. Столоверчение не выявило эфира. Скорость света вдоль направления движения и поперек оставалась одной и той же, как её определил Олаф Рёмер (с которого началась наша книга) по затмению спутников Юпитера. Лоренц знал об этом, но ничего не мог с собой поделать — эфир должен

быть! Ради сохранения эфира он придумал новый эффект в физике. Он предположил, что равномерно движущееся тело сокращает свои размеры вдоль направления движения! Да, Лоренц предположил, что сокращение размеров, вызванное относительным движением, было пропорционально знаменитому корню из специальной теории относительности Эйнштейна:

$$\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}.$$

Это — так называемые преобразования Лоренца в СТО. Ну и конечно, в полном соответствии с принципом Владимира Арнольда, нашёлся человек, который опередил Лоренца. Это был ирландский физик Джордж Фицджеральд[66]. Говорят, что Лоренц считал это сокращение не реальным. Но при этом говорил о каких-то изменениях электромагнитного взаимодействия в движущейся системе отсчёта.

Однако вскоре с увлечением эфиром было покончено. В 1905 г. Эйнштейн предложил выкинуть эфир из физики и объяснил, что скорость света не изменяется в пустоте никогда, а значит, и нет никакого эфира. Эфира, может, и нет, но и пустота прожила только лет 30, и то в основном у Фридриха Ницше, придумавшего своё знаменитое НИЧТО («*Ты хоть бы смайлик поставил*!» — *Уффф*).

Но природа недолго терпела. Не прошло и полвека, как в 1935 г. английский физик Поль Дирак, работая над релятивисткой квантовой теорией элек-

[66] Кстати, официально преобразования Лоренца в учебниках называют преобразованиями Лоренца—Фицджеральда.

трона вдруг начал заполнять пустоту. (*«Как говорят в народе — замутил» — Уффф.*) И вновь подуло эфиром. Давайте рассмотрим электрон в пустоте. Раз мы строим релятивистскую теорию, то масса электрона в любой момент должна рассчитываться по формуле Лоренца:

$$m = m_e / \sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2},$$

соответственно, энергия

$$E = mc^2 = m_e / \sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}.$$

Напомним, что m_e — масса покоя электрона. Возведём в квадрат и вспомним, что импульс электрона $p = mv$. Тогда получим знаменитое выражение $E^2 - p^2c^2 = m_e^2c^4 = \mathbf{const}$. Как говорят физики — инвариант. Значит в любой момент времени $E^2 = m_e^2c^4 + p^2c^2$. И тут случается чудо математики. Извлечём корень квадратный:

$$E = \pm. \sqrt{m_e c^2 + p^2c^2}.$$

Следовательно, решил Дирак, мы должны принимать и состояния с отрицательной энергией! А где же наиболее вероятное состояние. Конечно, там где энергия минимальна. Но тогда и электрон в пустоте должен был кануть в Лету. Но это же невозможно. И тогда Поль Дирак предположил, что в самом пустом пространстве все отрицательные уровни энергии заполнены. Конечно, прямо мы эти состояния не видим, поэтому и частицы на этих уровнях оказываются не реальными, а виртуальными. Так что, если вы думаете, что виртуальный мир появился с приходом в нашу жизнь Интернета, то ошибаетесь, он появился лет 80 назад.

Какая-то алгебраическая эквилибристика, возмутится читатель. Если бы это было так, то пустота бы имела бесконечный отрицательный заряд и затянула бы туда весь мир. Да, так же подумал Дирак, взял опять тот инвариант и опять начал извлекать корни. В какой-то момент, он понял, что извлекая из инварианта массу покоя, опять надо извлекать корень и возникнет частица с отрицательной массой. Если приписать ей положительный заряд и отправить её на отрицательные уровни, предварительно назвав позитроном, то они в точности компенсируют бесконечный заряд виртуальных электронов. Да это же виртуальное позитронно-электронное море! Да, море — его так и назвали морем Дирака. Казалось бы, ни тех, ни других нет, а есть только пустота. Но, во-первых, позитрон буквально тут же был открыт. И у него, как и предполагал Дирак, была масса электрона, а заряд как у электрона, но положительный. А главное, оказалось, что и пустота исчезла.

Давайте проделаем мысленный эксперимент. Возьмём обычный электрический конденсатор и откачаем бесконечным насосом всё из пространства между его пластинами (рис. 32).

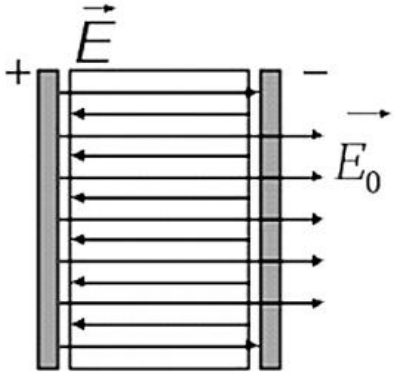


Рис. 32

Если море Дирака существует, то виртуальные частицы в вакууме это почувствуют: позитроны начнут смещаться к отрицательно заряженной пластинке, а электроны — к положительной. В электродинамике сплошных сред («*А может пятниц?*» —

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$$

Уффф) есть такое понятие — поляризация диэлектрика. Так что, если прав Дирак, возникнет поляризация пустоты. И виртуальные частицы слегка скомпенсируют электрическое поле между пластинами.

Если измерять силу притяжения пластин (они ведь противоположного знака), то получится немного меньше, чем по классическим формулам XIX в. Вакуум поляризуется. Этот эффект физики впервые наблюдали в лаборатории. Ну, хорошо, все-таки, что-то там, в вакууме, появилось, но ведь оно появилось не случайно. Вы же подключили конденсатор, т. е. приложили к пустоте электрическое поле. Вот пустота оказалась не чистой. Ну, в общем, правильно. Прикладывая электрическое поле к пустоте, мы как бы активировали электромагнитный вакуум. А вот если нет никакого конденсатора — есть там что-нибудь или нет? Вопрос.

Во всяком случае, виртуальные позитроны и электроны можно извлечь из вакуума, и тогда они станут реальными. Давайте теперь мысленно увеличивать заряд обкладок конденсатора. На любую виртуальную пару электрон-позитрон действует электрическая сила Ee. Эта сила пытается их растащить. Условие игры тут такое. Если сила растащит их на расстояние больше длины волны де Бройля, для релятивистского электрона $\lambda_{комптон} = h/mc$ (она называется комптоновской длиной волны), то частицы становятся реальными. Мы со стороны увидим, как из пустоты возникнет реальная пара частиц. При этом энергия этих частиц возникает в результате работы электрического поля. Главное условие возникновения, чтобы работа $A = eE\lambda_{комптон}$ превосходила сумму масс покоя родившихся частиц. Отсюда появляется минимальное критическое поле — его называют швингеровским

в честь американского физика Джулиана Швингера нобелевского лауреата 1965 года. Если приложить к пустоте поле больше швингеровского из пустоты начнут появляться электрон-позитронные пары. По закону сохранения энергии $eE_{ш}\ \lambda_{комптон} = 2\ m_e c^2$. Поскольку энергия покоя электрона равна 0,5 МэВ, то, если подать на конденсатор в пустоте заряд обеспечивающий разность потенциалов 1 МэВ, начнут рождаться пары. Значение критического поля Швингера в системе СГС $E_{ш} = 4 \cdot 10^{13}$. В этой системе единиц и магнитное и электрическое поля в пустоте измеряются в одинаковых единицах, что удобно.

Однако пустота в квантовой механике это совсем не эфир. По аналогии с электромагнитным каждое взаимодействие обладает своими виртуальными океанами, и их называют вакуумом соответствующего поля. Электронный, мюонный, бозонный... Этот вакуум не может быть причиной увлечения света или сопротивления ему.

Итак, получилось как на известных переговорах в Бресте[67] — ни пустоты, ни эфира («*Единственное, что тебя извиняет за такие аналогии, это то, что на дворе 19-й год» — Уффф.*).

Физика — это геометрия, а геометрия — физика?

А геометрия — это физика. Что собственно вокруг происходит? Не вертите головой — я вас спрашиваю, уважаемый читатель. Что вообще происходит

[67] Здесь автор пытается обыграть известную историческую загогулину, когда Троцкий в 1918 г. подписал с немцами унизительный договор о мире.

в нашем мире? Единственное, что такое происходит — это то, что меняются расположения предметов в пространстве. Хочу сказать, что более этого вообще ничего не происходит. Потому что когда положение предметов не изменяется, то нет и мира. Что же такое физика как не наука, объясняющая происходящее. Вот, например, что такое инертная масса в механике Ньютона? Пока тело покоится, мы не знаем что такое инертная масса. Пока тело двигается равномерно и прямолинейно, оно покоится[68]. Вот что говорит второй закон механики Ньютона. При попытке изменить относительную конфигурацию тел в пространстве, т. е. сдвинуть с места какие-либо предметы, со стороны предметов, а быть может и со стороны пространства, возникает некое сопротивление. Как сказал бы Галилео Галилей — тела обладают волей сопротивления изменению покоя или равномерного и прямолинейного движения. Коэффициент сопротивления называется массой инерции тела. Мир как бы сообщает вам — не трогайте меня, иначе я отберу у вас силы. Об этом и говорит второй закон Ньютона. Сопротивляемость покою пропорциональна силе, делённой на изменение скорости изменения конфигурации тела во Вселенной.

$$m_{\text{инерции}} = F/a.$$

[68] Это открыл Галилео Галилей, однажды проснувшись в трюме во время штиля. Вы знаете, иногда, проснувшись, человек открывает многое о своём мире. Вот так и Галилей с пронзительной ясностью вдруг понял, что прямолинейное равномерное движение неотличимо от покоя.

Оказывается, что эта сопротивляемость постоянная величина и не зависит от приложенной силы. Мир состоит из пространства с вкраплениями материальных точек в определённой конфигурации. Ничего кроме расстояний между этими точками в мире нет. Попытка изменить конфигурацию описывается уравнением Ньютона и называется динамикой Ньютона. Две тысячи лет человечество вычисляло расстояния между телами по формулам Эвклида. И ошибалось!

Первым на эту ошибку указал русский учёный Николай Иванович Лобачевский. 7 февраля 1826 г. Лобачевский представил для публикации в «*Записках физико-математического отделения*» сочинение: «*Сжатое изложение начал геометрии со строгим доказательством теоремы о параллельных*» (на французском языке). В нем и последующих работах Лобачевский впервые представил миру одно из величайших открытий последних 2 тыс. лет. Оказалось, что знаменитый пятый постулат Эвклида о параллельных прямых не только не может быть доказан, но и может выглядеть совершенно по-другому. Многозначительно то, что великий Гаусс, пришедший к таким же идеям, не стал их обнародовать, потому что испугался хулы коллег — столь высок был авторитет Эвклида. В конфиденциальных письмах он уподобил возможную реакцию научной общественности нападению ос из разворошенного осиного гнезда. Но Лобачевский в 20-е гг. XIX в. был задиристым, своенравным молодым человеком и не побоялся пойти против тысячелетних авторитетов. Но и досталось потом Николаю Ивановичу. Фактически, отечественные математики, включая великого классика математики



Рис. 33. Николай Иванович Лобачевский (1792—1856)

Остроградского, мягко выражаясь, не оценили важности его трудов[69].

Однако сам Лобачевский прекрасно понимал важность своего открытия. И не только для математики, но и для физики.

Пятый постулат Эвклида утверждает, что через точку вне данной прямой проходит одна и только одна линия, не пересекающаяся с нею (*Уффф*!). Возможно, по памяти я не совсем точно его воспроизвел, но надо сказать, что и у самого Эвклида всё это звучало по-другому, да и в точной науке геометрии есть разные эквивалентные формулировки. Погуглил тут я в Википедии и нашел такую: два отрезка не могут иметь пространство. Очень хорошая формулировка. В переводе на более современный язык, она означает, что два отрезка не могут ограничивать никакую площадь на плоскости! Однажды пересекаясь, все прямые в геометрии Эвклида никогда уже не встречаются. Границы открыты! «Но ведь это же не догма», — воскликнул Лобачевский. Всякий кто ел арбузы, знает, что это не так, подсказывает мне *Уффф*. Правда насчёт

[69] К счастью, у Лобачевского появился знатный покровитель — граф М. Н. Мусин-Пушкин — участник Отечественной войны 1812 г. Командовал Каазачьими войсками. Он приветствовал избрание Лобачевского ректором Казанского университета и способствовал его деятельности на этом посту в течение почти 20 лет. Поразительно, сколь разными были эти люди. Но одно понятно, что человек, опалённый войной, знает цену людям и знает, кого можно поставить во главе войска, хотя бы и научного.

арбузов, это скорее к немецкому математику Риману, который, познакомившись с трудами Лобачевского, сочинил и свою — риманову геометрию на шаре.

А Лобачевский, как друг казачьего генерала, естественно разместил свои постулаты на седле боевой лошади. Каждый, кто сидел на лошади, знает, что сумма углов треугольника на седле всегда меньше 180° (рис. 34) («*Хорошо излагаете, Владимир Михайлович*!» — *Уффф*). А уж параллельных прямых там видимо-невидимо — бесконечное множество.

Не сразу Лобачевскому удалось опубликовать свой труд в России. Позже узнала математическая Европа, к счастью, впоследствии признавшая русского гения. Как и всякий великий ученый, Лобачевский не ограничился просто формальными математическими рассуждениями, но и предположил, что непредсказуемые изменения могут произойти и в физике, если окажется, что наш мир неэвклидов. Кстати, слово неэвклидовый придумал другой русский гений — Фёдор Михайлович Достоевский.

Итак, вернёмся к физике. Т. е. к геометрии. Ньютоновская инертная масса продемонстрировала сопротивляемость перемещению — этакую обло-

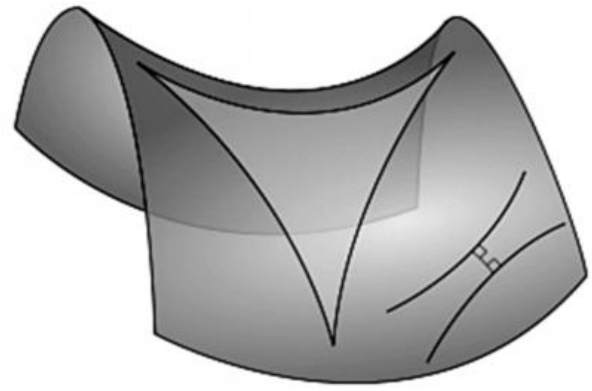


Рис. 34

мовщину мироздания. Но как быть с тяготением? Вспомним открытие Галилео Галилея, бросавшего камни с Пизанской Башни. Тяжелые и легкие камни падали с башни за одинаковое время. Значит, они двигались с одинаковым ускорением! Но ускорение — это сила, делённая на инертную массу. В то же время тяготение Ньютона пропорционально тяготеющей массе:

$$F = GMm_т / R^2 = m_и a.$$

Значит масса тяготеющая, пропорциональна массе инертной: $m_т \sim m_и$.

Я специально пока ставлю знак пропорциональности, хотя сейчас установлено, что обе массы равны с огромной точностью. Итак, повторим словами. Что же мы получили: воля тел притягиваться друг к другу равна воле тел оставаться в покое и сохранять конфигурацию в геометрическом пространстве! Но неподвижность и покой — это геометрические понятия. Значит, гравитация — это геометрия! — воскликнул Эйнштейн. Было ли это так? Неведомо, но равенство тяготеющей массы и массы инерционной, открытое Галилеем, Эйнштейн называл принципом эквивалентности. А именно этот принцип и был положен в основу общей теории относительности (ОТО). Хотя, на самом деле, Эйнштейн написал отдельную статью, в которой шаг за шагом представил свои физические соображения вывода уравнений ОТО.

Эрнст Мах и его полезное заблуждение

Есть две вещи, которые плохо воспринимают современные физики. Это эфир и принцип Маха. Какое-то к ним отношение, как у астрономов к астрологам, или

как у химиков к алхимикам, а иногда — у физиков к химикам («*Это шутка, надо понимать?*» — *Уффф*, «*Да — студенческая*» — В. М.). Между тем, и принцип Маха, и понятие эфира, были полезными и способствовали появлению новой физики. А Эйнштейн прямо написал, что отправным пунктом создания ОТО стал для него принцип Маха.

А я люблю ошибки великих людей — они помогают понять, как добываются знания о мире, и полезны для тех, кто хочет стать настоящим учёным. Давайте обсудим принцип Маха. Тем более никто пока не смог его логически опровергнуть, хотя он был придуман Махом в XIX в. Представим себе два пустых (!) пространства *O* и *O'*— излагает парадокс Маха Альберт Эйнштейн в своей статье о том, как он придумывал ОТО. В каждом — одинаковые две Земли, только одна со штришком. Обычный землянин говорит: «Я вращаюсь относительно пространства *O*, и центробежная сила инерции вытягивает её вдоль экватора — Земля сплюснута». Землянин-штрих говорит: «Я неподвижен относительно пространства *O'*, и поэтому Земля круглая». Повторяю, оба пространства пусты! Чтобы выяснить, кто из наблюдателей прав, нужно найти разницу между двумя пустыми пространствами *O* и *O'*. *(См. вклейку 20)*

Но невозможно различить два пустых пространства. Совместить показания обоих наблюдателей можно только предположив, что силы инерции в пустом пространстве не действуют, а что бы установить факт вращения, нужны какие-то опорные тела — например, далекие звёзды, тогда и появится инерция. Эйнштейн даже предположил, что масса тел возни-

кает как раз из-за присутствия далёких тел — что совершенно не подтвердилось в его теории гравитации![70]

Во всяком случае, принцип Маха иллюстрирует таинственную связь пространства и времени с силами тяготения. И человек, свободно падающий в лифте, испытывает невесомость, и, очевидно, движение с ускорением уничтожает в некоторых случаях гравитацию. Так может, гравитация это и есть пространство-время, вернее кривое пространство-время? Так, слова Лобачевского о революции в физике полностью подтвердились поле создания Эйнштейном ОТО. Ведь теория гравитации — это теория геометрическая — теория пространства-времени, в которой геометрия определяется вложенной в пространство-время массой. Более того в зависимости от вещества, заполняющего пространство-время, мир может описываться геометрий Лобачевского или Римана.

Уравнения Эйнштейна (система 16-ти независимых дифференциальных уравнений) устроены просто: слева геометрия, справа материя (частицы, массы, жидкости). То есть геометрия (читай, кривизна) пространства, есть функция массы:

Геометрия = *f* (массы-энергии).

Кажется, если нет никаких тел во Вселенной, то кривизна геометрии равна нулю. Живем в пространстве-времени Эвклида (точнее в четырёхмерном про-

[70] Ваш непокорный слуга после открытия ускоренного разбегания Вселенной попытался возродить принцип Маха и первоначальную идею Эйнштейна о возникновении инерции (В. М. Липунов, Mach's Principle and Cosmology Term, arXiv: Astroph/0210013, 2002 https://arxiv.org/abs/astro-ph/0210013).

странстве-времени Минковского). Ну а массы они и искривляют это самое пространство.

А вот и не так. В уравнения Эйнштейна, словно арифметическая ошибка, вкралась некая постоянная величина неизвестной природы. Она вообще ни от чего не зависела и никак не определялась из классических теорий. Обозначил Эйнштейн эту постоянную большой греческой буквой лямбда **λ**. («*Похожа на крышу дома, — можно было обыграть, — не торопись*» — *Уффф*.) Вообще в физике давно известны величины, к которым можно прибавить или убавить постоянную, и ничего не изменится. Например, потенциальная энергия в поле тяжести. Можно к ней что угодно прибавить, а падение с высоты h всё равно приведёт к одному и тому же ответу — эмжеаш. Механика Ньютона чувствует разность потенциалов, но не сам потенциал. В теории относительности уже сложнее. Там энергия весит и создает гравитацию, а теперь мы понимаем, что и геометрию. Уравнения Эйнштейна более правильно писать так:

Геометрия + λ = *f* (массы).

«Ну, подумаешь, какая-то константа», — воскликнет читатель. Но сам Эйнштейн невзлюбил непрошеную гостью. Во-первых, её никто не звал в эти уравнения, и никаких фундаментальных принципов её присутствие не требовало. Даже таких, как принцип Маха. Хотя… Во-вторых, оказывается, если **λ** не равно нулю, то Вселенная оказывается кривой, даже если из неё выкинуть все массы! Это показал французский физик де Ситтер, который в 1920 г. решил уравнения Эйнштейна для пустой Вселенной.

Как это вам понравится — на дворе 20-й год, ни тебе квантовой механики, ни тебе Моря Дирака, а пустота, оказывается, может быть кривой? Причём, это не просто эффект системы отчёта, на самом деле это то самое седло, на котором скакал Мусин-Пушкин помогать Лобачевскому потрясать основы мироздания. Т. е. уравнение **Геометрия + λ = 0**, содержало геометрию Лобачевского при положительной константе Лямбда.

Давайте «затвердим» по-другому, чтобы понять всё разочарование Эйнштейна. Мало того, что инертная масса не обращалась в ноль в пустой Вселенной, так и кривизна мира появлялась без всяких масс!!! «Да положите её равной нулю, и пусть себе там определяет что хочет», — сказал бы отчаявшийся человек. Но английский физик и астрофизик Фред Хойл был не таким человеком.

Космический вакуум Хойла

Когда в 1928 г. Эдвин Хаббл открыл свой закон разбегания галактик его имени, постоянная оказалась равной H_0 **= 500(км/с)/Мпс**. Если перейти к обратной величине — хаббловскому времени, то получится

$$t_x = 1/H_0 = \textbf{2 млрд лет (1928 г.).}$$

Если галактики разбегаются с замедлением, то по закону Кеплера возраст Вселенной составляет 2/3 от этой цифры, а это вообще — полтора миллиарда лет — меньше возраста скал в Скандинавии. Каково же было работать во Вселенной, которая младше звезды, дающей жизнь всему земному и им самим в том числе? Недаром сказано, что многие знания — многие печали.



Рис. 35.
Фред Хойл
(1915—2001).

А можно ли построить Вселенную, которая моложе звёзд? Спустя двадцать лет, ответ на этот вопрос дал замечательный английский астрофизик и писатель Фред Хойл: конечно нет, но, может быть, мы принимаем за возраст Вселенной нечто совсем иное? В 1948 г. в журнале королевского астрономического общества вышла замечательная, я бы даже назвал её фантастической, работа Хойла [71], в которой он разрешил парадокс Хаббла.

Фред Хойл принадлежал к тому редкому классу учёных, интерес и знания которых настолько широки, что они подобно горным орлам парят над огромными разделами человеческих знаний, наблюдая самые важные места связи между явлениями во Вселенной («*Ну ты и загнул, почти как кавказский тост*» — *Уфф*). Недаром Фред Хойл, кроме научных статей, писал и романы, которыми мы — школьники 60-х гг. — увлекались и наслаждались[72].

И в начале 1948 г. проявилась его интуиция и способность объяснять сложные вещи на простом (нью-

---

[71] F. Hole, 1948, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 108, p. 372.

[72] Помню хорошо роман Фреда Хойла «Чёрное облако», в котором он иногда иронично изображал некоторых коллег по Кембриджу, попавших в фантастическую ситуацию: в Солнечную систему проникло чёрное облако и затмило Солнце. Странно, почему Голливуд до сих пор не откликнулся на подобный сюжетный ход.

тоновском) языке. В первой главе, рассматривая «фридмановскую»[73] модель Вселенной, которая была стандартной до 1980 г., — модель Большого Взрыва (как её метко назвал сам Фред Хойл) — он смог объяснить все космологические модели, существовавшие к тому времени в рамках ОТО, с космологической постоянной. Вырежем опять небольшую капельку Вселенной и запишем ускорение на её поверхности. Во «фридмановской» модели при отсутствии давления вещества ($p = 0$) ускорение просто записывается через закон всемирного тяготения Ньютона $g = -GM/R^2 = -4/3\pi G\rho R$. А вот, если добавить константу λ, получится дополнительная сила:

$$g = -4/3\pi G\rho R + 1/3\ \lambda c^2 R.$$

Присмотримся внимательнее и увидим (вслед за Хойлом), что это уравнение чревато двумя великими открытиями. Первое: видно, что положительная λ эквивалентна антигравитации! Ну, это ещё стало ясно после статьи Эйнштейна о статическом мире, которую поправил Фридман. Таким образом, всемирное тяготение в природе описывается и гравитацией и антигравитацией, причём антигравитация изменяется по закону Гука. Так примирились Ньютон и Гук в одном уравнении! А в реальном мире? («*Это на том свете, что ли?*»— *Уфф*). Минуточку, дождитесь конца главы. А пока вернёмся к уравнению. Каждый школьник, и тем более первокурсник, а уж академик с профессором точно слыхали, что радиальное поле сил «консер-

[73] Я специально беру в кавычки её название, потому что на самом деле в 1920 г. А. А. Фридман нашёл самый широкий класс космологических моделей, в который входит и постоянная лямбда.

вативно». Работа сил такого поля не зависит от пути и равна разности потенциалов, а потенциал равен:

$$\Phi = -GM/R - 1/6\ \lambda c^2 R^2 = -4\pi G\rho/3 - \lambda c^2 R^2/6.$$

А теперь вспомним, что в потенциальном поле сохраняется сумма кинетической и потенциальной энергий пробного тела массой 1 г: $\Phi + v^2/2 = k = \text{const}$. И вот получается алгебраическое уравнение, описывающее скорость расширения (или сжатия) Вселенной:

$$v^2 = (-8\pi G\rho/3 - k/R^2 - \lambda c^2/3)\ R^2.$$

Случай равенства нулю $\lambda = k = 0$ — это и есть движение ракеты со второй космической скоростью, или расширение «фридмановской» Вселенной с критической плотностью $\rho_{кр} = 3H^2/8\pi G$. Неподвижный мир Эйнштейна соответствует случаю $v = 0$ и, следовательно, он реализуется, только если сила гравитации в точности компенсируется антигравитацией: $\lambda c^2/3 = 8\pi G\rho/3 - k/R^2$. Остальные случаи изображены на рисунке 36.

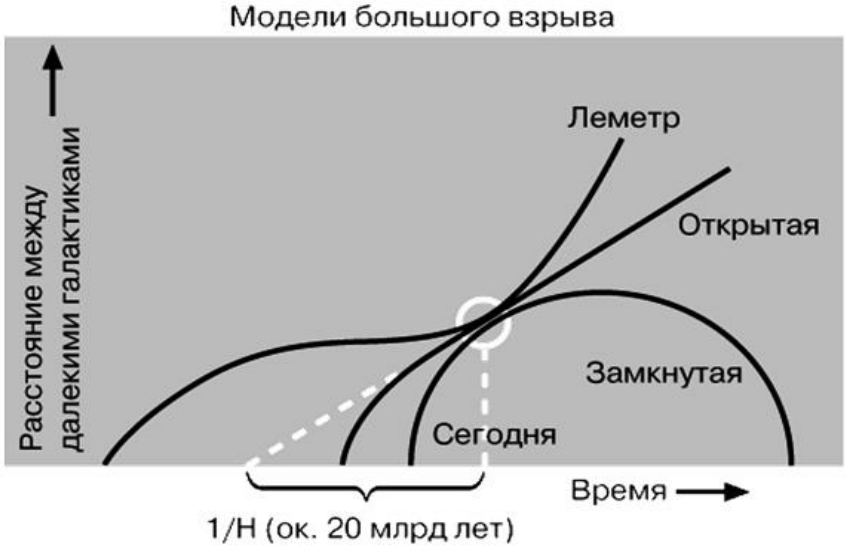


Рис. 36

Случай же когда Вселенная пустая $\rho = 0$ и $k = 0$, соответствует Вселенной де Ситтера. Скорость расширения пробного тела в ней $g \sim R$. Так это же уравнение антипружинки («*Тепло*!» — *Уффф*) $R \sim e^{\sqrt{\Lambda c}t}$. Это главное удивительное свойство Вселенной де Ситтера. Любые пробные тела экспоненциально быстро разбегаются друг от друга! Что-то это нам напоминает! Но секундочку, говорит Хойл — модель де Ситтера не подходит нашей Вселенной — в ней нет вещества! Но Жорж Леметр предлагает модель Вселенной, вещество которой поначалу расширяется медленно, проходит точку неустойчивого равновесия Эйнштейна, переходит к экспоненциальному расширению и постепенно превращается во Вселенную де Ситтера с экспоненциальным разбеганием.

Далее Хойл отмечает результаты Фридмана, который получил все космологические решения для произвольных констант в этом уравнении — и с положительным лямбда-членом, и с отрицательным, и с веществом! Но, возвращаясь к Леметру, сетует на то, что тот использует константу λ — этого Джина из бутылки (по выражению Зельдовича), в которой сам Эйнштейн уже разочаровался, поскольку Вселенная без акта творения рухнула.

Хойл ставит себе сложнейшую в идейном смысле задачу — каким образом наполнить Вселенную веществом, чтобы она экспоненциально разбегалась, но её плотность оставалась неизменной? При этом он стремился разрешить, наконец, один из главных парадоксов — четвёртую ложку дёгтя: почему Вселенная моложе объектов её наполняющих! И он решает эту задача введением в физическую картину мира некого специального поля, способного

порождать энергию (например, в виде элементарных частиц). Причём таким чудны́м образом, чтобы уменьшение плотности Вселенной из-за экспоненциального расширения полностью компенсировалось рождением энергии-массы из пустоты! Фред Хойл вычисляет тензор энергии-импульса этого неизвестного в современной ему физике таинственного поля, и результат в точности соответствует уравнению состояния $p = -u$. И ещё раз подчёркивает, что такое поле по своему действию в точности эквивалентно действию положительной постоянной λ. Это было гениальное прозрение и одновременно необъявленное вероломное вторжение в область физики элементарных частиц. Да это же «инфляция, раздувание!» — должен был воскликнуть Алан Гут (но даже не сослался на Хойла).

Одним из самых главных достижений этой работы Хойла стало понимание того, что постоянная Хаббла не обязательно является мерилом возраста Вселенной, и она может быть постоянной! Теперь большие числа Дирака приобретают совсем другой смысл. В такой Вселенной и постоянная тяготения и постоянная Хаббла действительно являются двумя независимыми фундаментальными константами.

Давайте проиллюстрируем с помощью универсального упростителя физических уравнений сказанное выше. В присутствии вещества ускорение небольшого шарика описывается изменённой гравитационной массой $M_G = (4/3)\pi R^3(\rho c^2 + 3p)$, т. е. к плотности надо добавить три давления. Положив $\lambda = 0$ и $p = -\rho c^2$, получим уравнение которое фигурировало у нас, когда мы рассказывали про инфляцию: $g = 8/3\pi G\rho c^2 R$. Таким образом, действие космологического члена

оказалось аналогично действию скалярного поля с плотностью:

$$\rho_{\lambda} = \lambda/8\pi G.$$

В 1965 г. советский физик Эраст Глинер независимо пришёл к аналогичному заключению о природе космологической постоянной. А, по-видимому, первым об этом догадался Альберт Эйнштейн, получив этот результат на ресторанной салфетке, чем и подтвердил правило Арнольда. Но может быть, следует сделать исключение из этого правила, и физический вакуум, равный по действию постоянной λ, называть вакуумом Эйнштейна—Хойла—Глинера?

Учитывая, что Хойл пишет в астрономическом журнале, он старается уделить внимание наблюдательным астрономическим явлениям. Хойл описывает устройство стационарной Вселенной. Благодаря присутствию гипотетического поля далёкие галактики экспоненциально разбегаются за линию видимого горизонта, которая определяется временем, прошедшим с момента их образования. Например, галактика, образовавшаяся 100 млрд лет назад, убежала далеко за горизонт событий, видимых нам с Земли, возникшей 4 млрд лет назад. За это время из пустоты народились новые частицы, из которых сформировались новые галактики, поддерживая плотность Вселенной постоянной! Многие из этих галактик успели уже скрыться, а мы сегодня видим только те, которые родились 2 млрд лет назад! Таким образом, постоянная Хаббла уже не имеет никакого отношения к возрасту Вселенной, а скорее отражает наш возраст.

Фред Хойл прожил долгую плодотворную жизнь (умер в 2001 г. в возрасте 86 лет), но, к сожалению,

мне не удалось увидеть его на симпозиумах и конференциях. Да и ни мне одному. Начиная с 70-х гг., он перестал посещать симпозиумы, уединившись в своем домике у озера. Модель Большого Взрыва победила повсеместно! Научное сообщество, если вспоминало Вселенную Хойла, то с иронией, как анекдот, в котором из пустоты рождались не только галактики и атомы, но и всякие полезные вещи типа холодильников, шкафов и денег.

Удивительным образом Вселенная Хойла подвергалась насмешкам, как на западе, так и на востоке. В СССР творение атомов из пустоты считалось идеалистической чепухой. А между тем ещё в 50–60-е гг. рождение частиц из вакуума стало не только фактом теории, но экспериментально подтверждёнными результатами. Физики легко рождали электрон-позитронные пары в швингеровских конденсаторах. Уже фактически возращено в физику скалярное поле и предсказан Бозон Хиггса. И в СССР в 60-е гг. можно было прочесть о необходимости введения космологической постоянной. Так пророчески пишет в Большой Советской энциклопедии космолог Абрам Зельманов: «*Итак, для устранения обсуждаемого противоречия нужно предположить, что космологическая постоянная положительна и что в настоящее время (а, следовательно, и в будущем) расширение все ускоряется (так что оно не может смениться сжатием)*». Студентов на спецкурсе Зельманова было немного, но ученики его известны во всём мире.

Но Вселенная Хойла мало упоминалась в работах астрофизиков и космологов. Постоянная Хаббла монотонно уменьшалась, Вселенная, естественно, в модели

Большого Взрыва старела, и казалось, что парадокс молодой Вселенной потихоньку терял актуальность.

Вселенная — как портрет Дориана Грея!

В последующие 20 лет после работы Хойла постоянная Хаббла уменьшилась почти в 10 раз! Во столько же раз вырос возраст пылевой стадии Вселенной: $t_в = 2/3H^{-1}$. Вселенная, как портрет Дориана Грея в одноименном романе Оскара Уайльда, старела. Здесь аналогия с портретом гораздо глубже, чем кажется. Ведь то, что мы называем Вселенной — это всего лишь некая тень (абрис, контур, портрет) прообраза, который мы придумали с помощью математики и физики, опираясь на данные наблюдений астрономов. Вселенная старела, и казалось, что ещё чуть-чуть и объекты, населяющие Вселенную, станут её моложе. Парадокс молодой Вселенной сойдет на нет, и будем мы жить в ней поживать, да добра наживать. Но не тут-то было. Старела не только Вселенная, но и её жители. Конечно, речь не идёт о физическом старении. Речь идёт об уточнении астрономических наблюдений и наших знаний о Вселенной. Напомним, что постоянная Хаббла определялась делением расстояния R между галактиками на их скорость v. Если скорость их измерялась по эффекту Доплера довольно точно, то вот с расстоянием были проблемы.

Дело в том, что очень долго астрономы не могли найти подходящую линейку, чтобы измерить эти самые расстояния. Нужен был своеобразный астрономический стандартный метр наподобие того, что лежит в палате мер и весов парижской академии наук.

До галактик не дойдёшь с обычным метром. Не помогали и классические методы измерения до звёзд методом годичного параллакса. Если присмотреться, то можно увидеть, как звёзды в течение года бегают по небу. Наверное, каждый помнит, как бегут назад дома и деревья, когда едешь на поезде. Я люблю смотреть в окно. Близкие предметы предательски улетают куда-то в хвост поезда, а вот далекие, те, что на горизонте, мчатся за тобой как друзья-товарищи. Это называется параллаксом — кажущимся смещением предметов из-за перемещения наблюдателя. Это смещение зависит от расстояния и, следовательно, наблюдая его, можно измерить удалённость предметов. Земля ещё лучший поезд. Она мчится по орбите вокруг Солнца в тысячи раз быстрее поезда. Каждые полгода нас бросает на триста миллионов километров туда-сюда. Земля смещается относительно звёзд и те, что поближе бегут в обратную сторону. Но сколько ни смотри, с Земли не увидишь, как бегают Галактики, и расстояние до них отсюда не найдёшь. Слишком они далеко.

В астрономии роль стандартного метра выполняет стандартная свеча, мощность (или как говорят астрономы — светимость) которой известна. Её можно назвать фотометрическим метром! Действительно, по закону сохранения энергии поток света от источника (физики называют его освещённостью) обратно пропорционален квадрату расстояния R до источника: $F = L / 4\pi R^2$.

Если вы знаете L, то определив F, находите R. Но звёзды — не лампочки. На них, как правило, не написано, что эта, положим, 60 Вт, а эта — 100 Вт. Но есть одно исключение. Есть такой класс переменных

звёзд — Цефеиды[74]. Это огромные гигантские шары в тысячи раз мощнее лампочки по имени Солнца. Но особую роль Цефеид в изучении нашей Вселенной имеет одно удивительное их свойство. Они строго периодически меняют свой блеск, как будто кто-то их вывел из равновесия. В 1894 г. русский астроном Аристарх Аполлонович Белопольский — один из пионеров мировой спектроскопии, — снимая спектр δ Цефея в знаменитой Пулковской обсерватории, обнаружил, что блеск её синхронно менялся со скоростью движения поверхности, как будто она сжималась и расширялась периодически.

Но самое замечательное свойство было открыто американским астрономом Генриеттой Ливитт в 1908 г. Анализируя фотопластинки, полученные на Перуанской обсерватории (станция Гарвардской обсерватории США, созданная на частные пожертвования). Она обнаружила, что период цефеид пропорционален их светимости (на рисунке на оси ординат яркость?!).

Но как же она определила расстояние до них? А она и не определяла. Просто у нашей Галактики есть спутники — Магеллановы облака (вы их можете увидеть над русским роботом МАСТЕР в Южной Африке (см. рис. 37). Это — карликовые галактики, примерно в 30 раз меньше нашей Галактики — Млечного Пути. Однако даже в таких карликовых галактиках можно найти несколько десятков цефеид. При этом можно быть уверенным, что все Цефеиды находятся от нас

[74] Да — цефеиды это не поток метеоров — а особый класс переменных звёзд, родоначальником которого является звезда δ Цефея. Кстати, знаменитая Полярная звезда то же Цефеида!

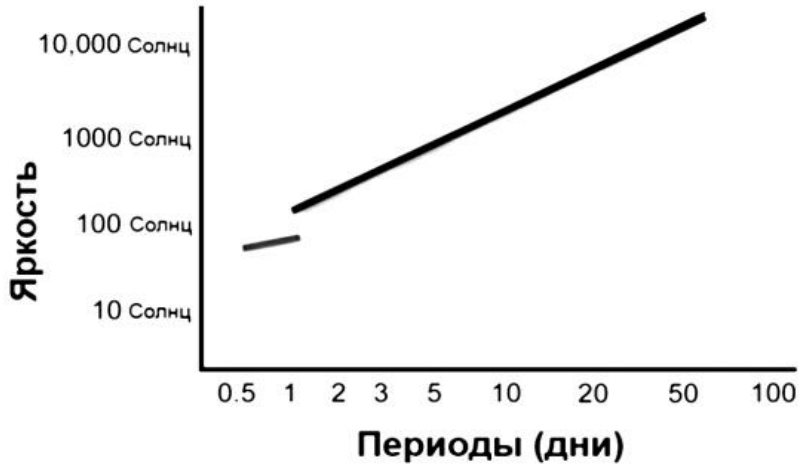


Рис. 37

на одинаковом расстоянии. Ведь галактики карликовые, и их размеры в 50 раз меньше расстояния до Магеллановых облаков. Так и был открыт закон «период-светимость» для Цефеид.

Измерил кривую блеска, нашёл период — получай светимость. Но не все так просто. Функция период-светимость должна иметь нуль-пункт — иначе расстояние будет получаться не в световых годах, а в единицах расстояния до какой-нибудь случайно выбранной Цефеиды. Вот если бы ближайшая Цефеида была бы так близко, что можно было бы измерить параллакс... Но такой звезды не было. И приходилось использовать косвенные оценки расстояния, которые время от времени изменялись. И эта задача — отыскание нуль-пункта (её называют калибровкой) — решалась десятилетиями. Но Цефеиды хоть яркие, но все-таки звёзды, и в далёких галактиках они тонут среди миллиардов обычных звёзд. Приходилось в качестве стандартной свечи использовать всё что ни попадёт под руку: сверхгиганты, шаровые скопле-

ния — это почти круглый звёздный рой в сотню тысяч звёзд, — да и сами галактики. Вот расстояния во Вселенной и ползли, т. е. уточнялись. Но всё-таки эта титаническая очень медленная работа астрономов двигалась в правильном направлении, и в 70-е гг. она уменьшила постоянную Хаббла до 50 (км/с)/Мпс, т. е. её обратная величина достигла значения почти 20 млрд лет. Самое время вздохнуть. Но тут уже теоретики забили в колокола, потому что в такой старой Вселенной плотность должна быть очень маленькой. Причём настолько, что космологический нуклеосинтез не сможет пережечь нужное количество водорода. Вселенная горячая — а плотности мало. Термоядерный синтез идёт коротко и со скрипом. Но, слава Богу, к концу 70-х гг. значение постоянной Хаббла отскочило к значению в 70 (км/с)/Мпс, вокруг которого она колеблется последние 40 лет. Ну, тут можно успокоиться. Но нет. Те же самые астрономы, т. е. это уже совсем другие, не прекращали поиски самых старых объектов во Вселенной, и то и дело появлялись статьи, в которых находили антиквариат с возрастом в 11—12 млрд лет. А я напомню, что при H = 70 (км/с)/Мпс возраст Вселенной равен

$$t = (2/3)1/H_0 < 10 \text{ млрд лет.}$$

Парадокс не исчезал! В 80-м г. появилась модель инфляции, найдены флуктуации реликтового излучения, доказано существование 25 % темного вещества. Закрыли парадокс тонкой настройки. Но осталась четвертая ложка дёгтя, которую мы сейчас и истолкуем.

Работа Хойла продемонстрировала верный путь — нельзя считать возраст по закону Кеплера. И потихоньку постоянная $\boldsymbol{\lambda}$ стала пробираться во Вселенную.

Джин, успешно загнанный обратно в бутылку усилиями нескольких поколений астрономов и физиков, то здесь, то там стал появляться совершенно в разных областях астрофизики («*Его за дверь, а он через окно*» — *Уффф*). Появлялась новая стандартная космологическая модель. Во-первых, её присутствие ощущалось по исследованиям флуктуаций реликтового фона Вселенной, во-вторых, теория образования структуры Вселенной (скоплений галактик и галактик одиноких) показывала, что необходимо подольше подержать расширение — уж больно маленькими оказались случайные скорости галактик — их называют дисперсией скоростей относительно хаббловского потока. Фактически, речь идёт о хаотической скорости или своеобразной температуре галактического роя во Вселенной. Температура при расширении падает. Однако хаотические скорости оказались настолько малыми, что речь пошла о более сильном расширении. Даже в таких экзотических областях, как исследование самых мощных взрывов во Вселенной — гамма-всплесков — обнаружилась какая-то скрытая, тёмная энергия. В 1995 г. мне с соавторами[75], удалось показать, что распределение гамма-всплесков по их потокам лучше всего объясняется, если Вселенная на 70 % состоит из тёмной энергии. Но в то время ещё многие сомневались в космологической природе гамма-всплесков, и работа прошла в этом смысле незамеченной. А в следующем году антигравитация оказалась обнаруженной.

Гром грянул, когда за дело взялись небольшие телескопы-роботы!

---

[75] Lipunov V. M., Postnov, K. A,Prokhorov M. E., 1995, Astrophysical Journal v. 454, p. 593.

Стандартная свеча Вселенной. Обнаружение антигравитации

Нет маленьких телескопов,
есть маленькие астрономы.
Народное.

Все мы слышали, что звёзды «падают», «вспыхивают» и «взрываются». Первое вообще не относится к звёздам, а вот вспышки и взрывы как раз характерны для звёзд. Самые мощные вспышки, когда на пустом месте появляется новая звезда, астрономы назвали сверхновыми. Теперь правда мы знаем, что никакая звезда на самом деле не появляется, а наоборот — гибнет!

В 1938 г. американский астроном Вальтер Бааде обратил внимание на то, что некоторые сверхновые, их назвали «тип Ia», очень похожи друг на друга по своему поведению. Под поведением астрономы понимают характер изменения блеска со временем — так называемую «кривую блеска». Причина такой «похожести» (рис. 38) до сих пор является предметом исследований. Но вот сама одинаковость даёт астрономам дополнительную линейку для измерения расстояний во Вселенной.

Подобно «стандартной свече» из школьного учебника физики сверхновые типа Ia можно использовать для определения расстояния до сверхновой: чем дальше свеча — тем слабее она выглядит для нас. Правда, при более детальном рассмотрении оказалось, что сверхновые Ia не совсем близнецы. Например, в максимуме блеска они отличаются друг от друга почти в 2 раза! Таким образом, свеча оказалась не такой уж

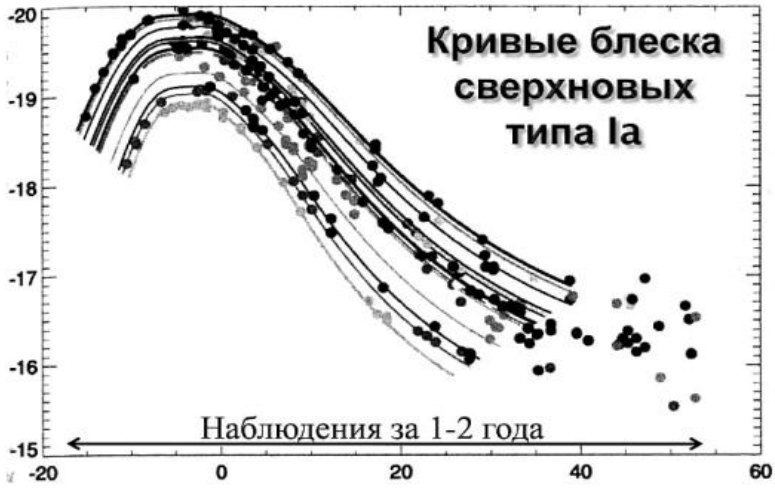


Рис. 38

стандартной. Ведь ошибка в определении расстояния может достигать 40 %. Ситуацию спас советский астроном Юрий Павлович Псковский[76] в 1968 г. Он обратил внимание на то, что более слабые сверхновые Ia гаснут быстрее. Таким образом, чем круче кривая падения блеска, тем слабее сверхновая в максимуме.

Почему так происходит неведомо до сих пор. Кстати, многие критики часто говорили о том, что мы, мол, не знаем что такое сверхновые типа Ia, так

[76] Кстати, Юрий Павлович Псковский за несколько лет до этого разгадал спектр сверхновых типа Ia. Обычно, астрономы в спектрах небесных тел обнаруживают линии самого распространённого во Вселенной химического элемента — водорода. Но спектры этих представляли собой в реальном смысле сплошной тёмный лес. На самом деле светлый лес — линии были эмиссионными, — но очень запутанный, как бурелом. Псковский первым догадался, что в этих спектрах нет никакого водрода вообще! А широкие пересекающиеся яркие полосы — это линии углерода и других более сложных элементов, разлетающихся во все стороны со скоростью 10 000 км/с!

ещё и не знаем, почему в их поведении наблюдаются странные особенности. Однако возражение это не имеет принципиальных оснований. Ведь когда продавец взвешивает мясо, он не обязан знать о структуре чугуна! *(«Да уже давно никто не пользуется гирями»*[77] *— Уууф*).

Эффект Псковского ценен ещё тем, что, как правило, астрономы открывают сверхновую позже момента максимума её блеска (падает она дольше, чем растёт). Ведь теперь для определения мощности сверхновой в максимуме достаточно измерить скорость падения после максимума. Правда, из-за ошибок, таких кривых блеска нужно иметь побольше, да и сверхновые должны быть подальше!

В 90-е гг. прошлого века, наконец, созрели условия для массового открытия сверхновых звёзд. Связано это было с появлением новых приёмников света — ПЗС[78]-матриц — и новых вычислительных средств — персональных компьютеров. И то, и другое резко увеличило вероятность открытия и измерения блеска сверхновых эвёзд. К 1998 г. удалось детально изучить несколько десятков сверхновых типа Ia и определить их блеск в максимуме. Будущие Нобелевские лауреаты были руководителями первой работы по массовому изучению далёких сверхновых звёзд. Они поступили следующим образом. Расстояние до сверхновых звёзд было определено по красному смещению (закон Хаббла). Сравнив мощность близких и далёких сверхновых, они пришли

[77] Можно сформулировать на текущий момент: взвешивая мясо на электронных весах, продавец не обязан знать теорему Котельникова.

[78] ПЗС — Пропорциональный зарядовый счётчик.

к странному выводу: чем дальше от нас сверхновая, тем она слабее по мощности (не по потоку, который естественно падает). И это с учётом эффекта Псковского! Либо нужно предположить, что далёкие сверхновые действительно слабее и есть какая-то внутренняя эволюция, либо проверить, не ошибаются ли они в определении расстояния по закону Хаббла.

Ну, действительно, воскликнули скептики, а давайте представим, что Вселенная заполнена некоей межгалактической пылью. Тогда, чем дальше сверхновая (да и любое другой объект), тем он будет казаться менее мощным из-за поглощения. В пыльной Вселенной не работает закон обратных квадратов! Но оказалось, пыли нужно слишком много. Пыль штука холодная и излучает в далёком инфракрасном диапазоне. Её бы обязательно заметили, например радиоастрономы, наблюдающие реликтовое излучение по искажениям — спектр его стал бы не похож на спектр чёрного тела. Тогда борцы с Джином попытались спрятать пыль внутри галактик. Мол, Вселенная наша недавно родилась, галактики стареют, и пыли становится всё меньше и меньше. Возможно, это и сработало бы. Но в XXI в. появились гораздо более совершенные телескопы-роботы, и с их помощью открывать сверхновые стали сотнями в год. Среди них удалось выделить класс сверхновых, не подверженных поглощению — они располагались либо в эллиптических галактиках, где пыли и газа практически нет, либо далеко на периферии спиральных галактик — в гало, где тоже дышится легче. Оказалось, что и «чистые» сверхновые тоже подвержены эффекту ослабления с расстоянием. Могла быть и внутренняя при-

чина. Например, сама сверхновая типа Ia — до сих пор настоящая загадка для астрофизиков. Мало того, что нет деталей процесса взрыва. Но и сама причина взрыва точно не установлена! Достаточно сказать, что эти причины называются сценариями.

Чем же они лучше гамма-всплесков, которые тоже показывали наличие антигравитации во Вселенной. А вот и лучше. Сверхновые Ia появились в астрономии почти на 30 лет раньше гамма-всплесков. По ним прямо или косвенно проведены тысячи научно-исследовательских работ. Сверхновые видны в видимом свете, в конце концов («*Хоть бы извинился за тавтологию*» — *Уффф*). Ну конечно, в телескоп. Приведу простой пример. «Живьем» оптическое свечение гамма-всплесков в момент взрыва я видел пару десятков штук[79]. А сверхновых — сотни. Из них первого типа — большинство. Так что SNIa — не идеальная, но вполне рабочая стандартная свеча астронома.

Почему же сверхновые блёкли с удалением? Да потому что, вычисляя их светимость, астрономы использовали Вселенную, в которой царит гравитация. А такая Вселенная всегда моложе и меньше (рис. 39).

Давайте вернёмся к нашему велосипедисту («*Я уж думал мы его выбросили из книги*» — *уффф*). Пусть пункт *А* совпадает с началом расширения Вселенной, а пункт *Б* — это Млечный Путь, в котором мы сейчас живём и из которого мы ведём наблюдения. Допустим, мы измерили расстояние *АБ* и скорость в настоящий момент. Время в пути — это и есть возраст Вселенной. Если просто разделить пройден-

[79] Глобальная сеть МАСТЕР лидирует по ранним наблюдениям.

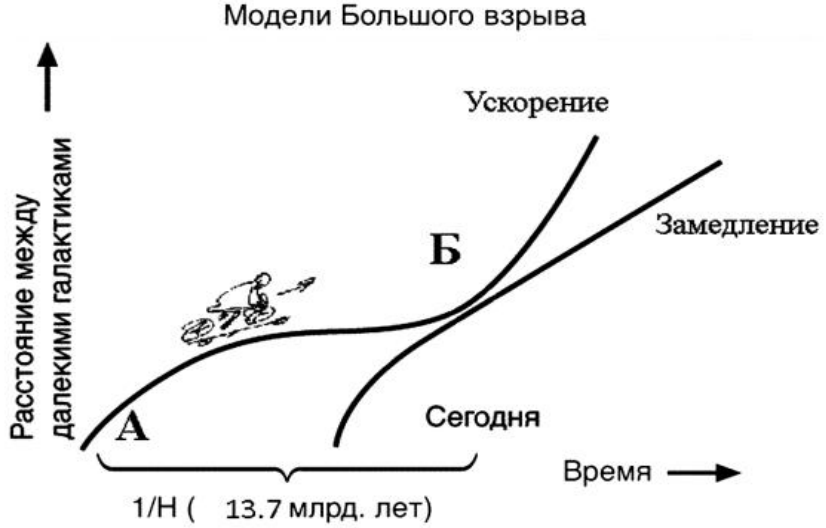


Рис. 39

ное расстояние на измеренную сегодня скорость, то получится величина $\mathbf{1/H \approx 14}$ млрд лет. Если бы Вселенная замедлялась по кеплеровскому закону, возраст Вселенной был бы значительно меньше — $\mathbf{2/3\ (1/H) \approx 9.3}$ млрд лет. В реальности Вселенная расширялась вначале с ускорением, а потом с замедлением (такую модель построил Жорж Леметр в 1927 г. — ровно через 5 лет после Александра Александровича Фридмана[80]). Но при ускоренном движении время в пути, наоборот, будет больше. Вопрос о времени путешествия из пункта *А* в пункт

[80] Полученную модель Вселенной сейчас на Западе иногда называют моделью Фридмана — Леметра — Робертсона — Уокера. Последние авторы после Фридмана получили частные решения его уравнений однородной изотропной Вселенной, опубликованных в 1922 г. Кто действительно здесь получил результат до Фридмана — это французский физик де Ситтер. Он нашёл геометрию мира, к которому в бесконечном будущем приходит фридмановская Вселенная с положительной космологической постоянной (1920).

Б (вопрос о возрасте Вселенной) упирается в среднюю скорость движения. Если в прошлом ускорение было, то средняя скорость окажется меньше наблюдаемой. Это значит, что наша Вселенная становится старше и решается четвёртый парадокс молодой Вселенной! Вот этот факт и был установлен двумя группами исследователей, лидеры которых — Сол Перлматтер, Брайан Шмидт и Адам Райсс — получили Нобелевскую премию по физике 2011 г. — За открытие ускоренного расширения Вселенной. И решающую роль в этом открытии сыграли маленькие роботизированные телескопы.

Величина измеренного ускорения позволяла определить плотность энергии космического вакуума ρ_λ. Давайте посмотрим на эту алгебраистику. Полное ускорение Вселенной определяется вкладом тяготения $g = -4/3\pi G\rho R + 1/3\lambda c^2 R$. Эквивалентная плотность тёмной энергии оказывается равной:

$$\rho_\lambda = \lambda/8\pi G \approx (0{,}7)\, 3H_0^2/8\pi G \approx 10^{-29}\ \text{г/см}^3.$$

Вселенная получила свой возраст — 13,7 млрд лет. Полная безразмерная плотность Вселенной оказалась равной единице, на чём и настаивал Игорь Новиков.

Кстати, если плотность разделить на массу атому водорода, то, как раз получится величина, необходимая Хойлу — один атом водорода в ведре. Вселенная расширяется, но её плотность не изменяется. Почти.

Оказалось, что плотность энергии космического вакуума примерно равна 70 % от критической плотности Вселенной! Круг замкнулся, а Вселенная на всех парах продолжает экспоненциальное раздувание!

Большое число номер два N2

«Да это же инфляция, вызванная скалярным полем» — воскликнули Андрей Линде, Алан Гут и Алексей Старобинский. «Да это же космическая энергия вакуума» — воскликнули Хойл, Глинер и Чернин!

Да, большое искушение назвать современное ускорение инфляцией какого-нибудь одного из самых слабеньких скалярных полей. Как же, слабеньких! 70 % массы Вселенной запрятано в энергии космического вакуума. Но с чем сравнивать? Так понятно же с чем. В инфляционном сценарии раздувания Вселенной требовалось скалярное поле с плотностью, близкой к планковской: $\rho_{инф} \sim m_{pl}/l_{pl}^{\ 3} \approx 10^{94}$ г/см^3. А плотность вакуума $\rho_\lambda \approx 3H_0^{\ 2}/8\pi G = 10^{-29}$ г/см^3. Их отношение:

$$N2 = \rho_{pl}/\ \rho_\lambda \sim 10^{121}.$$

Это безразмерное число вам ничего не напоминает? («*Не томи*» — *Ууфф*.) Хорошо. Прочту последнюю формулу словами: отношение энергии вакуума, предсказанного всей современной стандартной моделью элементарных частиц, основанной на теории относительности и квантовой механике, к наблюдаемой плотности космической энергии равно десять со стодвадцатью нулями! Вспомнили первое число **N1** — отношение возраста Вселенной ко времени жизни атома в классической физике XIX в.?

А к чему привело безразмерное число в начале прошлого века? Мир так тряхануло (в прямом и переносном смысле), что в пору говорить о миротрясении! Физики поступились всеми фундаментальными принципами. Вместо стройной, как орбиты планет,

Солнечной системы, мы получили призрачное размытое и трясущееся строение атома. А ведь число $N1 = 10^{26}$. Какую же цену мы должны заплатить теперь, когда узнали число $N2 = 10^{121}$? Какой переворот в мироздании должен последовать за этим?

Но почему мы уверены, что обнаружили именно константу λ? Ведь пока Нобелевскую премию дали не за открытие космической энергии вакуума, а за открытие ускорения Вселенной! А может быть ускорение это результат действия целой квинтэссенции физических полей и вовсе не лямбда-член?

Так что же открыл Хаббл? Парадокс Сэндиджа

Я не любитель слоганов, крылатых мыслей и прочих поговорок и частушек. Все эти яркие выражения стоят ровно столько, сколько они стоят. Это остроумно, но как всякая максима не универсально. Как говорил Фёдор Михайлович Достоевский: истина редко бывает остроумной («*Это тоже максима*» — *Уфф*). Вот возьмём пример с тёмной энергией. Вся история её открытия может быть продемонстрирована фразой: «Большое видится на расстоянии». Но тут же всплывает, другая поговорка: «В своём глазу бревна не увидать».

Ещё до открытия ускоренного расширения Вселенной такое бревно решили поискать российские астрофизики Артур Давидович Чернин и Игорь Дмитриевич Караченцев. Дело, сами понимаете, это очень тонкое. Сложился удачный тандем — теоретик Чернин и экспериментатор Караченцев. У Караченцева под рукой, некогда самый боль-

шой в мире, 6-метровый телескоп Специальной Астрофизической Обсерватории Академии Наук. Телескоп отличный. Вообще умели кое-что делать в Союзе. На нём он начинал огромную работу по космографии ближайшей к нашей Галактике окрестности Вселенной.

Конечно, Караченцев был не единственным. Были и работы зарубежных коллег, да и продолжал свои наблюдения Караченцев уже с помощью американского космического телескопа Хаббл. Оказывается вовсе не надо уезжать из страны или платить огромные деньги, чтобы наблюдать на крупнейших телескопах мира. Достаточно поставить интересную задачу. А задача была замечательная. Надо было исследовать удивительный парадокс. «Ещё один, — скажет читатель и добавит, — вот вам и ещё одна ложка дёгтя». Но дело в том, что эта тема была не так популярна, и научное сообщество не придавало ей особого значения.

Время от времени у астрономов возникал вопрос, каким образом вообще Хабблу удалось определить постоянную своего имени?

Дело в том, что кроме разбегания галактик есть случайные скорости у тех же галактик. Ведь закон Хаббла справедлив только для однородной изотропной Вселенной! А галактики и их группы — уже никак не назовёшь однородностями. Закон Хаббла должен быть замыт случайными движениями на малых масштабах Вселенной. Ведь случайная скорость галактик не зависит от расстояния до них — она примерно одинакова и достигает нескольких сотен километров в секунду. Сравним с хаббловской скоростью. Например, при значении постоянной Хаббла

H = 70 (км/с)/Мпс, галактика, расположенная на расстоянии один мегапарсек, улетает всего со скоростью 70 км/с. А случайные скорости галактик исчисляются сотнями километров в секунду. Т. е. Хаббловское расширение на расстояниях менее 10 Мпс должно быть практически замыто случайными движениями. Но как же Хаббл обнаружил свой закон, если все его галактики находились внутри этого локального объема! Закона разбегания Хаббла в 1928 г. не должно было быть, как не должно было быть и самого разбегания галактик, открытого Слайфером! Но они есть! Это противоречие можно назвать парадоксом Сэндиджа — ученика Эдвина Хаббла, который был один из лучших исследователей ближней Метагалактики и как никто другой чувствовал, что здесь «зарыта какая-то собака». Это подтверждалось многолетними наблюдениями Караченцева и его сотрудников. Они повторили работу Хаббла на современном уровне и получили, что закон Хаббла виден, уже начиная с расстояния 1 Мпс, и прекрасно держит линию (рис. 40) внутри объёма в 10 Мпс![81] Чтобы это могло означать?

И ещё один ленинградец — астрофизик Артур Чернин — отрыл эту самую собаку. Давайте подсчитаем объём шара, в котором действие космического вакуума превзойдёт действие тяготеющего вещества. Для этого и понадобятся данные по космографии окружающего пространства Караченцева. Оказалось, что этот радиус равен одному мегапарсеку! Т. е. расстояние, на котором антигравитация побеждает тяготение (я бы назвал это расстояние точкой дружбы

[81] Караченцев И. Д., Макаров Д. И. Астрофизика 44 5 (2001)

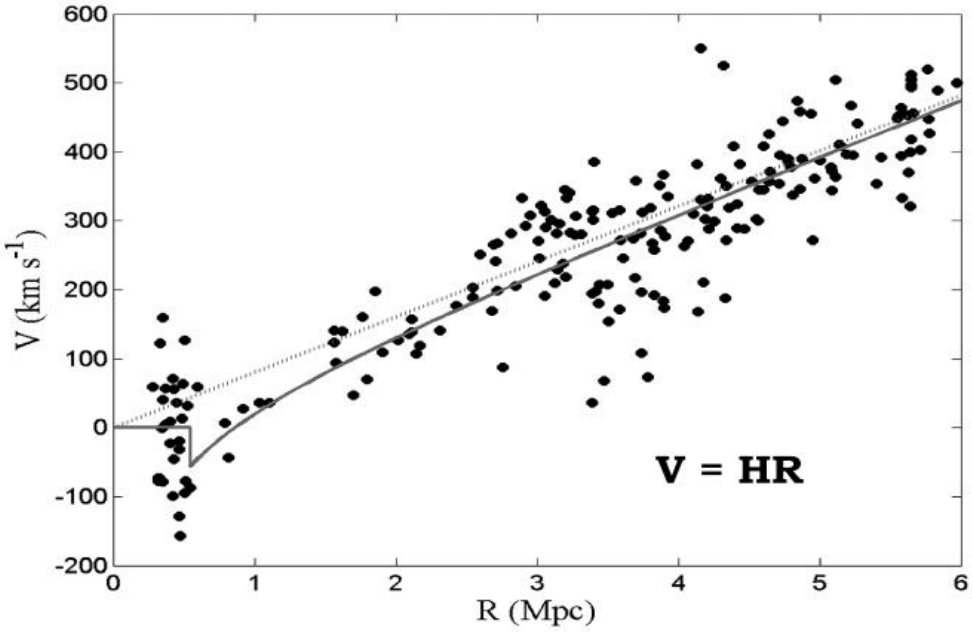


Рис. 40

Гука и Ньютона, но боюсь, что они до сих пор там ругаются на небесах) находится из уравнения:

$$g = -4/3\pi G\rho R + 1/3\lambda c^2 R = 0.$$

Это расстояние оказалось порядка 1Мпс. Да это вообще рядом! Напомню, что гигантская наша соседка — галактика в созвездии Андромеда — находится на расстоянии всего в три раза ближе — а она никуда от нас не улетает. 1 Мпс — это под боком. Его почти видно простым глазом. Люди с хорошим зрением видят галактику в созвездии Андромеда — она удалена от нас на 1 млн световых лет. Умножьте на три — и вы услышите дыхание антигравитации.

Начиная с одного мегапарсека, движением по Вселенной вещества и тёмной материи управляет антигравитация!!! А поскольку плотность космического вакуума есть константа, постольку локальная посто-

янная Хаббла должна совпасть с космологической постоянной Хаббла, определённой по более далеким галактикам. Смотрите — если бы не было тёмной энергии, Хаббл никогда бы не обнаружил свой закон. Энергия космического вакуума абсолютно однородна и изотропна, в отличие от обычного и тёмного вещества. Она заливает все уголки Вселенной и нигде не скучивается. Поэтому и диаграмма Хаббла такая ровненькая!

Теперь начинает проясняться истинный смысл открытия Хаббла. Фактически Эдвин Хаббл **открыл тёмную энергию или космический вакуум**[82]. Да, новый вид материи, с открытием которой наша Вселенная приобрела критическую плотность и стала плоской и, казалось, бесконечной.

Так, плоской и одинаковой кажется бескрайняя русская степь велосипедисту Пете («*В которой его и забыли*» — *Уфф*). Пете ещё ехать и ехать и он нет-нет, да и затянет какую-нибудь протяжную песню.

Песня про тёмную энергию. Мироздание Глинера

Вот скажите, на что именно наш велосипедист Петя, во весь опор мчащийся по просторам России, тратит свою мышечную энергию? «Как на что, — спросит толковый читатель, — на силу трения качения колес и сопротивление воздуха». Причём сопротивление более важная вещь, чем асфальт. Недаром

[82] Первым это понял А. Д. Чернин. Когда он в переписке сообщил известному коллеге на Западе об истинном значении открытия Хаббла, тот ответил, что опять надо переписывать историю астрономии.

велосипедисты надевают костюмы в обтяжку и напоминают подводных ныряльщиков. Так оно тормозит меньше. А может воздух вообще не тормозить? И воздух, и жидкость теоретически могут. Оказывается, есть ситуации, когда жидкости и газы не оказывают сопротивления. В гидромеханике это называется парадокс Д'Аламбера. Если шар поместить в поток идеальной ламинарной несжимаемой жидкости, действие её на шар будет равно нулю! Шар не чувствует потока жидкости (рис. 41). Это ясно в силу симметрии картины обтекания шара. Ведь сила — это разность давлений спереди и сзади, а в симметричном потоке она равна нулю. На самом деле реальные жидкости и газы всегда тормозят движущиеся предметы.

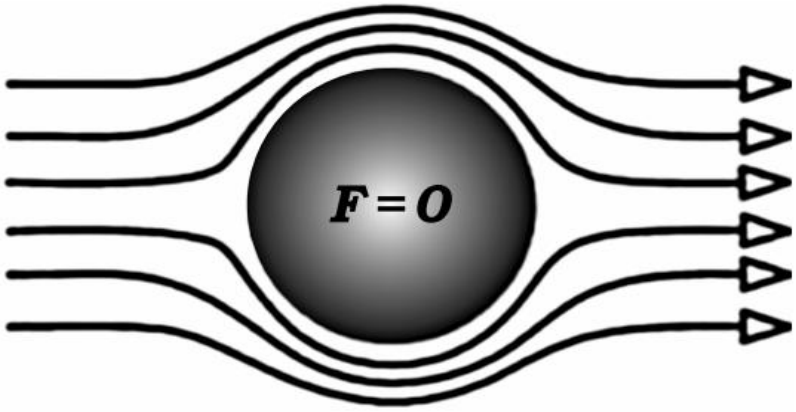


Рис. 41

Это связано с вязкостью — молекулярной, обусловленной столкновением частиц газа, или турбулентной — столкновение вихрей. И чтобы уменьшить появление вихрей велогонщики надевают специальную обтягивающую форму — сопротивление уменьшается.

А вот тёмная энергия, кажется, и есть та самая идеальная жидкость в природе! Итак, наш мир в ос-

новном состоит из тёмной энергии. Есть сильное ощущение, что она в точности по своему действию будет эквивалентна константе **λ**. Попробую им поделиться. Открытие Эйнштейна, Хойла и Глинера показывает, что действие $\lambda > 0$ эквивалентно присутствию некоего вещества с уравнением состояния $p = -u$. Т. е., в любом объёме, после удаления оттуда всяких частиц и физических полей, всегда остаётся ещё что-то. Это, конечно, не вещество. Ведь космический вакуум, имея плотность энергии, не оказывает никакого действия на движущиеся в нём объекты. Принцип Галилея — первый закон Ньютона не отменяется!

Но, конечно, это очень далеко от космического вакуума. Например, несимметричный объект уже будет испытывать подъёмную (или опускающую) силу. А при движении в космическом вакууме никакой подъёмной силы не возникает. Более того, плотность космического вакуума, подобно скорости света, не зависит от системы отсчёта! Это называется свойством инвариантности по отношению к преобразованиям Лоренца (Лоренц-инвариантность). Напомню, что константа **λ** появилась в уравнениях Эйнштейна не искусственно! Она ничем не хуже других величин, входящих в структуру уравнений. А структура уравнений Эйнштейна такова, что выполняется принцип эквивалентности, и масса инертная равна массе гравитационной. И гравитация описывается геометрией! Значит, эти принципы были не против того, чтобы в пустоте была энергия! Значит, геометрия знает нечто большее о мире, если она оставляет место для заполнения пустоты. А кто первый придумал энергию пустоты? Дирак — создатель релятивистской квантовой механики. Следовательно, геометрия и её прин-

ципы что-то такое знают о природе нашего мира, что оставило место и для квантовой механики. Геометрия предполагала появление волновой функции и неравенств Гейзенберга! Значит постоянная **λ** важнее квантовой механики!

Что же это за число такое — **λ**? Что оно может означать для будущего?

В 2002 г. Эраст Глинер выступил[83] с критикой теории инфляции. Помню, ко мне и, по-видимому, к другим учёным тогда обратился Гинзбург с просьбой прокомментировать статью Глинера, которую, несмотря на сопротивление со стороны «молодёжи», Виталий Лазаревич опубликовал в «Успехах Физических Наук», будучи главным редактором журнала. Конечно, Глинер формально прав в критике теории инфляции, когда пишет о том, что Вселенная, заполненная веществом с уравнением состояния $p = -u$, это есть Вселенная де Ситтера, и она никуда не раздувается! Следовательно, уравнение состояния в модели инфляции не может быть точно описано этим уравнением по Вселенной. Но более интересна даже не критика инфляционного сценария, а именно глинеровский сценарий Мироздания, опубликованный в его работе. Действительно, согласно строгому решению уравнений Эйнштейна с ненулевой космологической постоянной, Вселенная де Ситтера является статической неоднородной Вселенной, которую Глинер называет Мирозданием. Она никуда не расширяется, и никогда не рождалась. Но в ней, нет материи — одна пустота. Но пустота не пустая, а особая, кванто-

[83] Глинер Э. Б. УФН 172 221 (2002); Gliner E. B. Phys. Usp. 45 213 (2002)

во-механический вакуум называется. В какой-то момент в результате квантовых флуктуаций происходит спонтанное увеличение плотности энергии вакуума, сопровождающееся рождением вещества. Вселенная де Ситтера устроена таким образом, что если в неё впрыснуть облачко частиц, то оно начнёт разлетаться по экспоненциальному закону, как и в стандартном инфляционном сценарии. Правда Глинер сам отмечает, что главной загадкой его Мироздания является возникновение флуктуации энергии вакуума **λ** на сто двадцать порядков.

По мере расширения Вселенной уже через десяток-другой миллиардов лет энергия всех известных физических полей обратится практически в ноль, и весь мир почти на 100 % будет под управлением тёмной энергии. Но этот мир, как и раньше, называется Вселенная де Ситтера. Замечательно, что вся его геометрия описывается только одним числом. И число это — плотность энергии космического вакуума — постоянная **λ**. Друзья, когда говорят о будущем, рисуют утопии или антиутопии. Но никто не ожидал, что будущее будет столь простым («*И скучным*!» — *Уфф*).

Если это окажется правдой, **λ** — это код, пароль будущего нашего мира. И открытие энергии космического вакуума — это самое великое открытие за последние тысячелетия. Потому что именно это число — одно — описывает наше будущее («*Вот мы, наконец, начали предсказывать будущее*» — *Уфф*).

И замечательно, что мы с вами, дорогой читатель, попали в эту эпоху, когда человек измерил самую важную константу — число будущего. Подчеркнём, что она несводима к трем известным константам магического куба.

Будет страшно скучно, если константа $\boldsymbol{\lambda}$ окажется просто одним из скалярных полей.

«Да почему скучно?» — возмутился Андрей Линде и придумал… стационарную Вселенную.

Вселенная как кактус

Давайте немного пофантазируем. Представим себе, что в эволюции физики от Аристотеля до Ньютона что-то пошло не так («*И, как сказал один известный деятель, она пошла другим путём!*» — *Уффф*). В результате, вместо второго закона Ньютона, согласно которому сила пропорциональна произведению массы тела на ускорение $\boldsymbol{F = ma}$, остался бы закон Аристотеля, который полагал, что сила пропорциональна скорости: $\boldsymbol{F = mv}$. А почему нет? Все знают, что чем сильнее давишь на педаль газа, тем с большей скоростью едет автомобиль («*Да и можно не только на педали газа давить, будет тоже самое. Спросите у Пети, он может подтвердить*» — *Уффф*). Причём равномерно едет! Поэтому включил круиз-контроль: мощность мотора постоянна и скорость тоже! Хорошо, поверим. Теперь причешем уравнение Аристотеля. Разделим обе части на массу и положим её равной единице. Ну, просто рассмотрим движение пробных частиц — потом, если захотим, массу вернём. Ну и наконец, поменяем местами правую и левую части: $\boldsymbol{v = F.}$ Для простоты рассмотрим одномерное движение того же Пети: $\boldsymbol{v = F(x).}$

Что же это за движение такое? Да обычное движение вдоль координаты $\boldsymbol{x}$. Представьте себе, что на минуту вернулся ужасный закон Ньютона (уравнения стали сложнее, потому что ускорение сложнее ско-

рости). И пусть вы решили какую-то задачку о движении пробного тела в поле неких сил. В результате у вас получилась траектория. И не только — траектория движения, но и скорость в каждой точке. Так это и есть наше уравнение. Ну и в чём новость? Чем Аристотель лучше Ньютона? Просто назвали скорость силой, а ускорение как бы ни при чём. Да, всё это так, пока мы рассматриваем строго детерминированные движения, т. е. движения, у которых всё заранее предопределено. («*Это называется фатализмом!*» — *Уффф*). Не зря же Лаплас воскликнул: «Дайте мне начальные условия, и вам предскажу будущее!» А вот теперь давайте сделаем ещё один шаг. Предположим, что скорость в каждой точке известна только с некоторой вероятностью! Т. е. к строго детерминированной силе $F(x)$ добавилась некоторая случайная функция $f(t)$:

$$v = F(x) + f(t).$$

Это уравнение называется уравнением Ланжевена («*Круто*!» — *Уффф*). Да, его придумал крупный французский физик Поль Ланжевен[84], который участвовал в физической революции как бы из подполья, т. е. он блестяще объяснял и направлял развитие физики, когда мир стала сотрясать квантовая механика.

Пусть функция $f(t)$ абсолютно случайна. Представим, что пробное тело движется в некой лесной лощине (потенциальной яме) и постоянно стукается лбом о деревья, да так сильно, что напрочь забывает

[84] Например, именно Поль Ланжевен придумал парадокс Близнецов в теории относительности. Был научным руководителем Луи де Бройля. Поддержал Октябрьскую революцию и в 1919 г. основал Кружок друзей новой России.

о том, куда оно двигалось пред ударом. Такой процесс называется гауссовским. Тогда уравнение Ланжевена будет описывать случайное броуновское движение. Причём не обязательно стационарное. Но удивительно другое. Если взять много случайно блуждающих частиц, то можно описать поведение сложной системы — ансамбля этакого комариного роя, в потенциале силы F.

Из уравнения Ланжевена следует уравнение Фоккера—Планка, которое мы здесь написать не можем. Но идея его состоит в том, чтобы описать, как изменяется функция распределения ансамбля частиц, если каждая частица подвержена случайным флуктуациям.

Нечто похожее возникает в сценарии стохастической инфляции, предложенном Андреем Линде. Вначале есть некое «инфлатонное» скалярное поле. Функция $f(t)$ возникает из-за постоянно квантовых флуктуаций — Вселенную трясёт. В какой-то момент, в определённом месте флуктуация может стать столь большой, что начнётся раздувание, и появится Вселенная типа нашей. Но в другом месте похожая флуктуация родит другую раздувающуюся Вселенную и т. д. Возникнет целое дерево разбухающих Вселенных — МультиВселенная — наподобие огромного кактуса с многочисленными отростками (*Вклейку 21*).

Этот сценарий, как признаётся сам Линде, в некотором смысле возрождает мечту Фреда Хойла о стационарной Вселенной. Можно сказать, что в стационарной Вселенной Линде из ничего рождаются Вселенные, а не частицы. Хотя рождение частиц из пустоты звучало в 1948 г. не менее революционно.

Глава III
Назад в Будущее

Скажи, дорогой читатель, вот если ты приболел (не дай Бог, конечно), к какому врачу с бóльшим доверием ты пойдёшь — к старому или к молодому? К старому. Правильно. А почему? Да потому, что у старого за спиной таких, как ты пациентов, было огромное человеческое множество. А значит, у него и огромный медицинский опыт диагностики. Тысячи медицинских книжек, тысячи историй болезни, практика удач и провалов. Поэтому, чтобы поставить вам диагноз, врач как бы заглядывает в прошлое и отыскивает там похожий медицинский случай. Вот так и наша старушка Вселенная. Трудно себе даже представить то количество раз, которое она воспроизводила те или иные ситуации за последние 13,7 млрд лет. Ведь чтобы узнать о вашей судьбе, врачу достаточно вспомнить пару сотен пациентов, и чем там всё у них закончилось. Конечно, в медицине есть прогресс, но в природе прогресса нет! Поэтому если у вас есть вопросы о далеком будущем — лучше обратиться к Вселенной.

Пишем сценарий

Из первоначально сверхплотного состояния, сотрясаемого квантовыми флуктуациям, возникла наша, вначале крохотная, с размером в несколько план-

ковских длин (10^{-33} см), Вселенная. Подхваченная скалярным полем она стала экспоненциально раздуваться, и её масса возрастала подобно количеству зерна на шахматной доске падишаха из древней восточной притчи. При этом Вселенную продолжало квантово-механически трясти в полном соответствии с соотношениями Гейзенберга. И только постоянное рождение материи и энергии из скалярного вакуума сохраняло относительную однородность Вселенной.

Через несколько десятков, а может быть и сотен, планковских времён стадия инфляции закончилась — скалярное поле стало распадаться, порождая многочисленные элементарные частицы. Наконец, дело дошло до хиггсовского бозона — кванта скалярного поля, порождающего массы кварков и, соответственно, массы элементарных частиц, которые они составляют. Так возникли частицы и античастицы, которые по мере остывания почти полностью аннигилировали в фотоны. Но частиц оказалось больше, и они превратились в обычное вещество Вселенной — протоны, нейтроны и электроны.

Это загадочное неравенство между частицами и античастицами первым попытался решить советский физик — один из создателей термоядерной русской бомбы — Андрей Дмитриевич Сахаров. Дело в том, что после введения Дираком античастиц, предполагалось, что они полностью тождественны частицам, и просто имеют противоположный знак электрического заряда. Это так называемая С-симметрия (от ангийского слова Charge — заряд). Но экспериментаторы быстро опровергли это утверждение, и тогда теоретики придумали новую симметрию — СР-симметрию. СР-симметрия состояла в том, что

античастицы вели себя подобно частицам с обратным знаком и одновременно отражённым в зеркале. Конечно, речь идет не о нарциссизме, а об алгебраической операции с зеркальным отражением системы координат. Но и эта симметрия была опровергнута. Вот её-то Сахаров и решил использовать для объяснения, как теперь говорят, зарядовой асимметрии Вселенной, т. е. небольшое преобладание вещества над антивеществом.

Но теоретики не остановились и решили кроме зеркального отражения еще и поменять знак у времени, т. е. отправить античастицы в далёкое прошлое. CPT-инвариантность пока никто не опроверг.

В первые минуты Большого Взрыва пошли реакции нуклеосинтеза — появились лёгкие химические элементы. Почти весь гелий Вселенной образовался именно в этот период. Примерно через 10 000 лет, когда частицы тёмной материи оторвались от фотонов, они стали семенами, из которых через много миллионов лет прорастут первые галактики и их скопления. Скопления и сверхскопления галактик возникали в космологической печи, подобно блинам Зельдовича, поджаренным на масле джинсовской неустойчивости («*Кудряво!*» — *Уффф*).

Но все это было только в мире скрытой тёмной материи. Обычное вещество — барионное — не замечало гравитации, так как постоянно варилось в фотонном газе. И лишь через 300 000 лет барионная плазма рекомбинировала и стала прозрачной. Фотоны полетели в радиоуши аспиранта Пулковской обсерватории Тиграна Арамовича Шмаонова и, через 10 лет, двух радиоинженеров Арно Пензиаса и Роберта Вильсона. Так, через 300 000 после Большого Взрыва, в точном

соответствии с предсказанием Георгия Гамова, родилось реликтовое излучение Вселенной.

А барионы, затягиваемые гравитационными воронками тёмной материи, с курьерской скоростью стали объединяться в звёзды и галактики. При этом тёмное вещество не может особо следовать за барионным веществом. При сжатии «вимпы»[85] нагреваются, но отдать своё тепло не могут. Ведь «вимпы» не взаимодействуют с обычными частицами и ничего не излучают. Тёмная материя, как легкая вуаль, накрывает внешние области галактик и их скоплений. В одном из таких скоплений — в созвездии Волосы Вероники — Фриц Цвикки и схватил первый рулончик ткани тёмного платья Вселенной. А в недрах мириадов барионных звёзд загораются мириады термоядерных реакторов, словно алхимические лаборатории Вселенной, высвечивая самые плотные её уголки. Светящиеся звезды, — словно стразы на невидимой мантии Вселенной. Они проступают явно и отчетливо в Большом Компьютерном Синтезе структуры Вселенной Анатолия Клыпина (рис. 57). *(См. Вклейку, рис.30)*

Пресекаясь между собой, они создают так называемую сетчатую структуру Вселенной. Расчёт сетчатой структуры Вселенной — это отдельная, очень большая вычислительная задача, которой было посвящено немало человеческого и компьютерного времени. Известен один из самых детальных расчётов крупномасштабной структуры Вселенной — Bolshoy

---

[85] Вимпы — просторечный образованный прямой транскрипцией термин от английской аббревиатуры WIMP — (weak interaction matter particle) — слабовзаимодействующие с обычной материей частицы.

Computer Simulation[86], проделанный под руководством бывшего члена команды Зельдовича и моего однокашника — Анатолия Клыпина. Он показал, что действительно на определенной стадии образуются блины, на пересечении которых и высвечивается сетка Вселенной.

Зажглись первые звёзды нашего неба

Первые звёзды в нашей Вселенной образуются через несколько сот миллионов лет после начала расширения («*Зажглись первые звёзды чужого неба, — вспомнил цитату из одного пошлого романа*» — *Уфф*). Именно в этот момент начинают формироваться первые галактики и их скопления. В принципе, для образования звезды любой массы достаточно 10—20 млн лет. Но, звёзды ждут, пока невидимые протоскопления скрытой материи не затянут к себе нормальное вещество — водород и гелий, появившиеся в первые 5 мин жизни Вселенной в эпоху нуклеосинтеза. На это и уходит несколько сот миллионов лет, так что звёзды стартуют с десятикратным опозданием, но приходят первыми к финишу. Почему? Да вспомним теорию Джинса. Ведь внутри галактик уже не работает закон Хаббла — они уже гравитационно-связаны, причём тёмной материей. Значит, образование звёзд идет по закону гравитационной неустойчивости Джинса. Любое возмущение растёт экспоненциально: $\delta\rho/\rho \sim e^{t/t_{Джинса}}$, а время $t_{Джинса} \approx$ — это и есть время образования про-

[86] Здесь Анатолий Клыпин — один из руководителей проекта — обыгрывает название Большого театра — лучшего балетного театра мира (http://hipacc.ucsc.edu/Bolshoi/Collaborators.html).

тозвезды. Т. е. образование звёзд из барионов после первичного сжатия проходит тем быстрее, чем выше плотность газа. Это время иногда называют динамическим. Ведь это время свободного падения тела самого на себя! Его можно найти, разделив начальный радиус на вторую космическую скорость.

$$t_{\text{Джинса}} \sim R/\sqrt{2GM/R} \approx 1/\sqrt{M/R^3} \sim 1/\sqrt{\rho}.$$

Замечательно, что это время не зависит от массы звезды, а только от плотности протозвёздного вещества. Все звёзды, и большие, и маленькие, фрагментируются одновременно. Вспомним, что плотность вещества во Вселенной при $z = 10$ в тысячу раз выше современной. А поскольку вещество дополнительно сжато в галактиках, то реально протооблака имели плотность порядка 10^{-24} г/см^3 (близкую к плотности газа в нашей Галактике). Подставляя постоянную тяготения $1/G = 1{,}5 \cdot 10^7$ CGS и плотность 10^{-24} г/ см^3, получаем $t_{\text{Джинса}} \sim 10$ млн лет. Но это ещё не момент образования звезды. Дело в том, что при сжатии тепловая энергия растёт (за счёт работы сил гравитации). Сжатие в виде свободного падения вещества самоё на себя останавливается из-за накопленной тепловой энергии и, как следствие — роста давления вещества. Остановка происходит в момент, когда количество теплоты становится сравнимо по модулю с гравитационной энергией: $Q \approx |U|$. И нужно время, чтобы избавиться от тепловой энергии. Это время называется тепловым временем звезды, и оно примерно равно количеству теплоты, делённому на светимость звезды. По прошествии теплового времени звёзды зажигаются. Что значит «зажигаются»?

Упрямый Сэр Артур

Всю эту кашу с зажиганием заварил сэр Артур Эддингтон в начале 20-х годов прошлого века. Полный запас теплоты в звезде примерно равен её гравитационной энергии с обратным знаком, т. е. порядка GM^2/R. Для Солнца тепловая энергия равна $4 \cdot 10^{48}$ эрг. Каждую секунду Солнце теряет $4 \cdot 10^{33}$ эрг/с. При таких потерях запаса тепла хватит на 30 млн лет. Характерное время, за которое звезда теряет свою тепловую энергию, называется тепловым: $t_т = \sim K/L$:

$$t_т = Q/L = |U/2|/L \approx GM^2/RL \approx 3\ 10^7 \text{ лет}.$$

Однако Земля и Солнце существуют несколько миллиардов лет. Значит, внутри Солнца должен существовать источник энергии, который пополняет потери на излучение. Мы видели, что в звезде есть гигантский резервуар гравитационной энергии. Но черпать из него энергию безнаказанно нельзя. При каждом выплескивании энергии Солнце должно сжиматься. Причём оно должно уменьшаться в 2 раза каждые 30 млн лет. Нужно искать другой источник энергии. Его нашёл английский астрофизик, который работал в том же Кембриджском университете, что и Ньютон, но 200 годами позже. Эддингтон предположил, что внутри Солнца выделяется ядерная энергия вещества. Эта идея была высказана почти за 30 лет до создания термоядерной бомбы.

Откуда берётся ядерная энергия? Ядра атомов представляют собой смесь нейтронов и протонов (нуклонов). Полная энергия ядра состоит из потенциальной энергии ядерного притяжения, электрического отталкивания протонов и кинетического движения

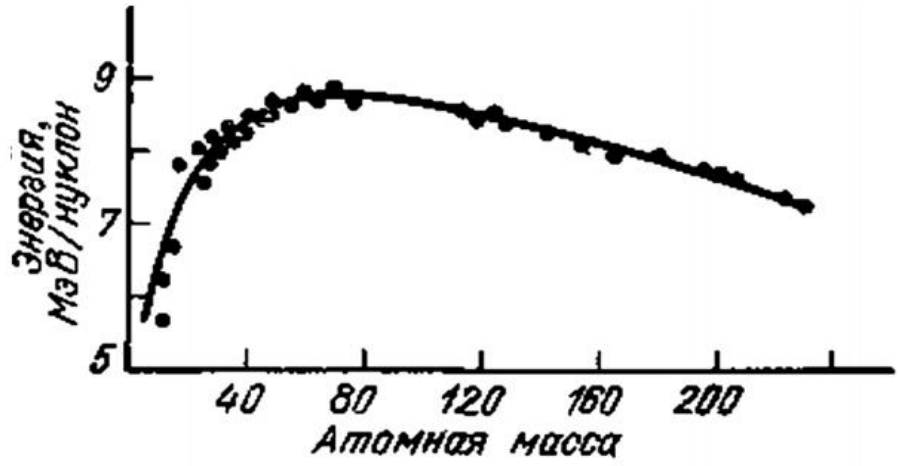


Рис. 41

всех частиц. На рисунке 41 показан график зависимости энергии одного нуклона от атомного номера химического элемента. Средняя энергия одного нуклона в ядре, взятая с обратным знаком, показывает, насколько сильно связаны частицы в ядре (насколько глубока потенциальная яма, в которую они попали). Глядя на этот график, мы видим, что наибольшей связью обладают элементы, группирующиеся вблизи железа. У более легких элементов нуклонов в ядре мало. Ведь энергия ядерного взаимодействия пропорциональна квадрату числа частиц — каждая частица взаимодействует с каждой! Кстати, по этой же причине и гравитационная энергия пропорциональна квадрату массы. Энергия, приходящаяся на одну частицу, растёт с ростом числа частиц в ядре. Но это справедливо только до тех пор, пока ядра не очень велики. Ядерные силы очень короткодействующие; они действуют на расстояниях 10^{-13} см, а при увеличении расстояния быстро уменьшаются. Поэтому в ядрах с большим количеством частиц нуклоны взаимодействуют только с ближайшими соседями.

А вот электрическое отталкивание, энергия которого положительна, из-за дальнодействия растёт пропорционально квадрату числа нуклонов (число протонов и нейтронов в ядрах примерно равно). Поэтому у ядер элементов более тяжёлых, чем железо, энергия связи начинает падать. График показывает, что лёгким элементам энергетически выгоднее превратиться в более тяжёлые, а сверхтяжёлым, наоборот, распасться. (Распад сверхтяжёлых элементов используется в атомных электростанциях и атомных бомбах).

Синтез — объединение легких элементов сопровождается гигантским энерговыделением. Например, четыре ядра атома водорода (протона) имеют массу $6{,}69 \cdot 10^{-24}$ г, а ядро гелия — $6{,}65 \cdot 10^{-24}$ г. Дефект массы объясняется теорией относительности. По формуле Эйнштейна полная энергия ядра гелия связана с массой соотношением $\boldsymbol{E = Mc^2}$. В то же время энергия ядра складывается из суммы масс энергий покоя протонов и потенциальной энергии ядерного притяжения, которая отрицательна. Масса ядра оказывается меньше массы частиц его составляющих! Если каким-то образом из 1 г водорода синтезировать гелий, выделится энергия, равная $6 \cdot 10^{21}$ эрг/с. Это примерно 1 % полной энергии затраченного топлива. Вот вам и резервуар энергии. Тем временем, по идее Эддингтона был нанесен смертельный удар.

Георгий Гамов приходит на помощь Эддингтону

Скептики, действуя в рамках существующих законов, «доказали» полную несостоятельность термоядерного синтеза в центре Солнца. На рисунке 42 показан

график зависимости энергии взаимодействия двух протонов от расстояния между ними. Вдали взаимодействие определяется электрическим отталкиванием двух положительно заряженных частиц. Энергия взаимодействия положительна и растёт по мере сближения частиц как ~1/*R*. В максимуме энергия примерно равна 1000 кэВ = 1 МэВ. Затем, на расстоянии ~10^{-13} см, в силу вступает ядерное взаимодействие и появляется область с отрицательными энергиями, соответствующая связанному состоянию. Но чтобы проникнуть в область с отрицательной энергией, нужно преодолеть барьер в 1000 кэВ.

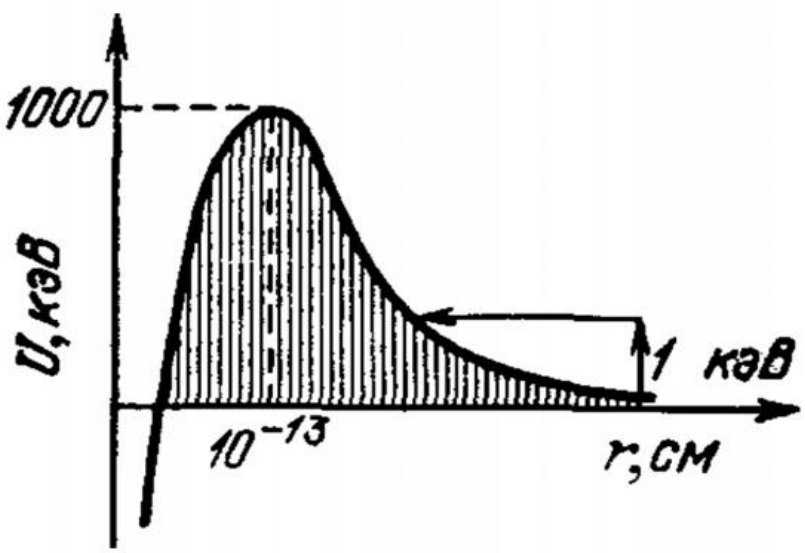


Рис. 42

Температура в центре Солнца оценивается из условия примерного равенства тепловой и гравитационной энергии $RM_\odot T_\odot \approx GM_\odot^2/R_\odot$ и оказывается равной $T_\odot \approx 10$ млн градусов. Средняя энергия протонов при такой температуре около $E_p = mv^2/2 = (3/2)kT \approx 1$ кэВ, т. е. в тысячу раз меньше, чем энергия, необходимая для синтеза гелия. В центре Солнца слишком холодно,

говорили скептики. Но сэр Артур Эддингтон упрямо заявлял: «Поищите-ка место погорячее!». Тогда это расценивалось как упрямство, теперь — как интуиция.

На помощь пришел Георгий Гамов. Открытая в 1926 г. квантовая механика поражала своими новыми фантастическими следствиями. И одно из первых следствий в области ядерной физики удалось объяснить нашему соотечественнику, члену великой Джазбанды — Георгию Гамову. Это так называемый — тунельный эффект, просачивание частиц под потенциальным барьером. Элементарные частицы могут просачиваться под барьер, даже если их энергия много меньше этого барьера. Если бы прыгун в высоту проскочил под планкой, ему не засчитали бы взятие высоты (рис. 42). Законы природы не так строги.

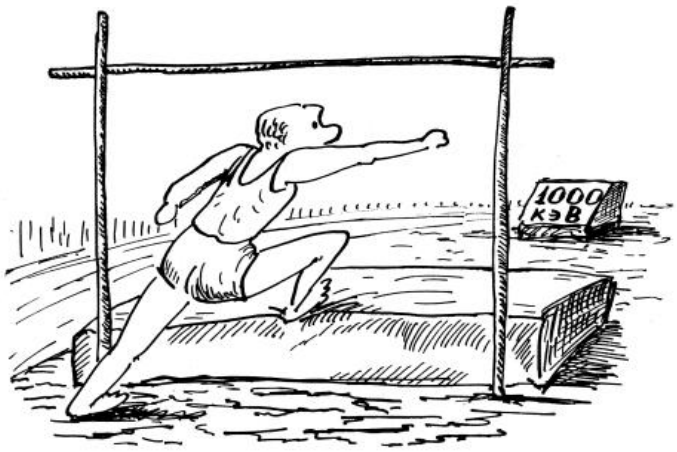


Рис. 42

Вспомним, что в квантовой механике каждой частице соответствует волновая функция. Она вообще-то комплексная и от этого не наблюдаемая. Наблюдается только её модуль — квадрат. Квадратом

комплексного числа называется произведение самого числа на комплексно-сопряжённое. Например, число $a + ib$ имеет комплексно-сопряжённое число $a - ib$. Перемножая их, получаем действительное число $a^2 + b^2$.

Волновая функция записывается как

$$\Psi = e^{i(\omega t - kx)} = \cos(\omega t - kx) + i \sin(\omega t - kx).$$

При этом волновое число определяется длиной волны де Бройля! Т. е. $k = 2\pi/\lambda_д = 2\pi mv/h = 2\pi p/h$.[87] И часть волновой функции, связанная с пространственной координатой окажется равной:

$$\Psi \sim e^{-i(2\pi p/h)x}.$$

Но при движении в потенциальном поле ядерных и кулоновских сил сумма кинетической и потенциальной энергии сохраняется:

$$p^2/2m + \Phi = const = E_0.$$

Обозначим константу энергии частицы, вылетевшей из ядра на бесконечности через E_0.

Представим себе, как это сделал впервые Георгий Гамов, что квантовая механика работает и в ядре атома. Это было сделать не так просто — впервые в истории человечества! Например, альфа-частица, находясь внутри радиоактивного ядра, должна иметь энергию меньше максимума барьера (рис. 61). Значит, импульс частицы должен быть $p = \sqrt{2m(E_0 - \Phi)}$. Таким образом, волновая функция будет выглядеть так:

$$\Psi = e^{2\pi i x \sqrt{2m(E_0 - \Phi)/h}}.$$

---

[87] Многим теоретикам лень писать 2π, и они переобозначают постоянную Планка — $\hbar = h/2\pi$.

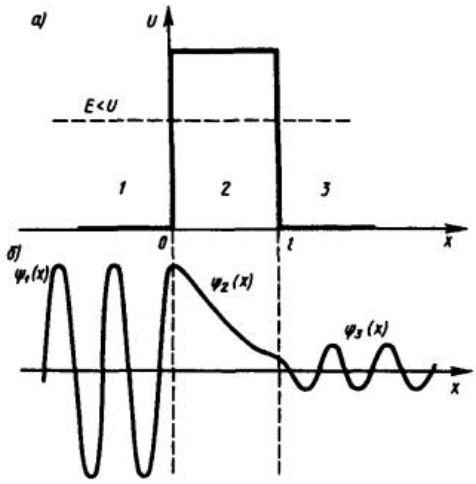


Рис. 43

Внутри ядра $E_0 > Ф$ и волновая функция это обычная волна, которая должна уложиться в ядре целое число раз. А вот под барьером $E_0 < Ф$ и волновая функция перестаёт быть комплексной и ведёт себя как экспонента. Если просто её возвести в квадрат, мы получим под барьером экспоненциально падающее с увеличением расстояния решение. Вероятность экспоненциально, как говорят физики, «зарезана», но не равна 0! Значит, ядро может самопроизвольно распадаться. Вот вам и подбарьерный переход. Причём подбарьерный переход работает в обе стороны и, следовательно, нуклоны могут слипаться, проходя под барьером, т. е. при гораздо меньших температурах.

Получается, что самый зримый квантовый эффект — это свечение звёзд. А если бы не квантовая механика?

Антоновские яблоки

Чтобы удивляться — надо много знать. Но вот никому же из миллионов дачников не придёт в голову спросить, откуда в антоновских яблоках железо?

Но мы-то уже многое знаем. Знаем, что в начале во Вселенной вообще ничего не было, потом появились элементарные частицы — частицы и античастицы аннигилировали в фотоны — будущее реликтовое излучение — и остался небольшой довесок в виде ба-

рионного вещества — водорода. В первые секунды после взрыва начал образовываться гелий, а потом... потом стоп машина, раздулся, охладился, и даже ионизированная плазма превратилась в нейтральный газ. Тут-то и вступила в дело неустойчивость Джинса, да и блины подоспели: в больших масштабах народились объекты — сверхскопления галактик (сотни мегапарсек), скопления галактик (десятки мегапарсек) сами галактик (100 тыс. парсек). Звёзды — вообще, говорил Маяковский, — плевочки размером с маковое зернышко, а там из мусора и планетные системы закрутились. На планетах возникла жизнь, кое-где даже появились разумные существа, стали сажать сады и культивировать антоновские яблоки с большим и полезным содержанием железа! Бац, а железо-то откуда?

«Из земли» — скажет кряжистый, с мозолистыми руками, фермер. «А в Земле, откуда?» — спросит ехидный друг-астроном. Хм, из протопланетного облака.

Ага, а в облаке, откуда железо-то? Наверное, из Вселенной. Так во Вселенной то его раньше и не было. Сдаюсь... — честно признается дачник.

Что только не предлагалось в качестве источника энергии звезды — и падение комет, раскаляющее поверхность Солнца добела, и гравитационное сжатие, и даже течение времени (эту фантастическую теорию изобрёл Николай Козырев — замечательный советский астрофизик, написавший несколько классических работ в 30-е гг. на мировом уровне[88]). Как

[88] В историю астрофизики вошло знаменитое приближение Козырева—Чандрасекара. Николай Козырев — один из моих любимых и сложных исследователей Вселенной. Не случайно В. Хлумов написал повесть «Графоманы», размышляя о его судьбе.

и Матвей Бронштейн, он попал под красное колесо истории. К счастью выжил. Был репрессирован, попал в лагерь, а по возвращении, стал создавать свою чу́дную механику... скорее всего ошибочную. Считаю, что человек с такой биографией имеет право на ошибки.

И только сэру Артуру Эддингтону пришла в голову идея использовать термоядерные реакции превращения водорода в гелий и так до самого железного железа, к нашей радости, садоводов, и для долгой и счастливой жизни звёзд.

Но смотрите, термоядерный реактор во Вселенной проработал всего сто секунд, водородная бомба взрывается за микросекунды, а Солнце себе горит миллиарды лет и не взрывается.

Все дело в том, что...

Солнце не утюг

Вот уже более полувека физики безуспешно пытаются обуздать термоядерную реакцию в специальных магнитных ловушках — Токамаках. Оказалось, удержание плазмы, в которой идут термоядерные реакции — это сложнейшая научно-техническая задача. А вот в звёздах термоядерные реакции идут устойчиво миллиарды лет. Почему же они не взрываются подобно водородным бомбам?

В равновесии энергия звезды, как и полная энергия двойной системы, отрицательна. Это общее свойство любых гравитационно-связанных систем. Тепловая энергия Q в равновесии всегда оказывается одного порядка с гравитационной (взятой с обратным знаком). Это обстоятельство приводит к удивительному

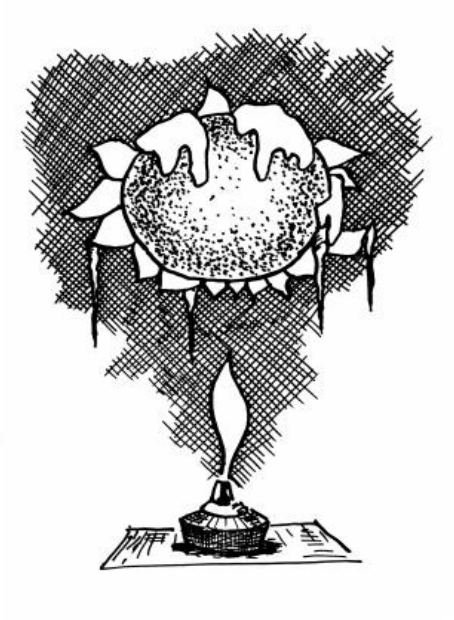


Рис. 44

свойству звёзд — отрицательной теплоёмкости (рисунок 44 иллюстрирует это). У окружающих нас предметов при нагревании (при увеличении их энергии) температура повышается — их теплоёмкость положительна. Например, чтобы нагреть утюг нужно обязательно вставить провод в розетку. А у звезды все наоборот. При увеличении полной энергии звезды (при её нагревании) тепловая энергия уменьшается, т. е. понижается средняя температура. Действительно, если увеличить энергию звезды (нагреть), то она расширится и перейдёт в новое равновесное состояние. Но при этом гравитационная энергия по модулю уменьшится (возрастёт радиус), а, следовательно, уменьшится и тепловая энергия. Звезда остынет! Причина этого состоит в том, что после увеличения энергии звезда расширяется и совершает работу против сил гравитации. Вот она и остывает.

Здесь нет нарушения законов термодинамики. Это выглядит для нас непривычно, потому что на Земле мы сталкиваемся с предметами, равновесие которых обеспечивается короткодействующими силами. Как правило, это силы молекулярного притяжения (в сущности, это обычные электрические силы, действующие между поляризованными, но в среднем нейтральными системами зарядов — молекулами). Рассматривая некоторый малый элемент тела, мы пренебрегаем его взаимодействием с другими, непосредственно не со-

прикасающимися частями. Мы можем так делать потому, что в природе есть электрические заряды обоих знаков, которые экранируют друг друга. А вот гравитационные заряды — массы — всегда одного знака[89].

Поэтому гравитационная сила остается дальнодействующей. Любой элемент звезды «чувствует» притяжение не только своего соседа, но и всех остальных участков звезды. Общее гравитационное поле создаёт резерв отрицательной энергии. При расширении звезды это скорее не резерв, а наоборот, ненасытный потребитель. А вот при охлаждении и сжатии звезды это уже резерв, повышающий её температуру. Звезды светят — значит, они должны сжиматься, теряя свою энергию.

Почему звёзды разные?

Чтобы воочию убедиться в том, насколько звёзды разные, взгляните с помощью небольшого телескопа на двойную звезду β Лебедя (Альбирео). Это одно из самых поразительных зрелищ, которое доступно любителям астрономии. В поле зрения телескопа вы увидите рядом две звезды — голубого и оранжевого цвета. Почему столь разные цвета? Предметы, окружающие нас, тоже имеют разные цвета. Как правило, это связано с различиями в их химическом составе, свойствах поверхности и т. д. Значит, причиной различий в цвете может быть химический состав. Но мы знаем, что цвет тела зависит ещё от температуры. Например, нагревая металл, мы увидим, что сначала он раскаляется докрасна, а потом добела. Так почему

[89] Антигравитация ощущается, только начиная с 1 Мпс.

же цвет звёзд разный? Из-за различий в температуре или в химическом составе?

Ответить на этот вопрос нам поможет спектральный анализ. Нужно снять спектр звезды, затем определить, каким химическим элементам принадлежат спектральные линии. Оказалось, что в спектрах звёзд разного цвета наблюдаются линии разных химических элементов. В видимом спектре жёлтых, как наше Солнце, звёзд самыми сильными линиями являются линии кальция. У голубых звёзд линии кальция не наблюдаются, и главными оказываются линии водорода, а у белых — преобладают линии гелия. Значит, звезды выглядят по-разному из-за различия в химическом составе.

Это совсем не так. Дело в том, что мощность спектральных линий того или иного химического элемента в спектре звезды определяется в основном температурой атмосферы звезды. У желтых звёзд типа Солнца самыми сильными линиями в видимом спектре являются линии однажды ионизованного кальция (однажды — значит, что у него оторван только один электрон). Но в спектрах голубых звёзд линии кальция исчезают, потому что эти звёзды горячее. В их атмосферах весь кальций почти полностью ионизован (от него оторван не один, а практически все электроны). При нагревании в первую очередь распадаются (ионизуются) атомы со слабой энергией связи. Поэтому линии таких атомов не наблюдаются в спектрах очень голубых звёзд, хотя химический состав примерно одинаков почти у всех звёзд. По массе звёзды на 70 % состоят из водорода, на 25—28 % — из гелия, а остальное приходится на более тяжёлые элементы.

Для характеристики цвета (или температуры) звезды астрономы используют спектральную классификацию. Каждой звезде в зависимости от её спектра приписывается одна из букв следующего ряда: OBAFGKM.

Классы располагаются в порядке убывания температур звёзд, от горячих — с температурами в несколько десятков тысяч градусов (звезды О—В) до холодных — с температурами в несколько тысяч градусов (звезды типа К—М). Для запоминания спектральных классов было придумано несколько вариантов шуточных фраз. Есть русский вариант: «Один Бритый Американец Финики Жевал Как Морковь». Желающие могут воспользоваться английским вариантом: «О Be A Fine Girl Kiss Me!»[90].

Поначалу вполне хватало семи букв, но потом оказалось, что различия между звёздами тоньше. Пришлось каждый спектральный класс разбить на 10 подклассов, обозначая каждый класс одной из семи букв и цифрой от 0 до 9 в таком порядке: ...B9, A0, Al, A2, ..., A9,... Солнце имеет спектральный класс G4. Таких звёзд в нашей Галактике миллионы.

Звёзды отличаются по температуре в десятки раз — от нескольких десятков тысяч градусов до тысяч градусов. Спектральная классификация позволяет определять температуру поверхности звёзд. Но еще сильнее звёзды отличаются по светимости. Напомним, что светимостью L звезды называется количество энергии, которое она излучает в единицу времени. Фактически светимость — это мощность, выделяемая в виде света. Светимость Солнца рав-

[90] О, будь хорошей девочкой, поцелуй меня.

на $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{33}$ Эрг/с. Есть звёзды в миллион раз мощнее и в тысячи раз слабее. Причина такого катастрофического разброса кроется в законе Стефана—Больцмана, энергия света пропорциональна четвёртой степени температуры. Солнце по своей светимости — ничем не примечательная карликовая звезда.

Для характеристики светимости звезды пользуются абсолютными звездными величинами. Если бы мы поместили все звезды на расстояние 32,6 световых лет (10 пс), то их видимые величины и были бы равны абсолютным. Солнце имеет абсолютную величину ~5. Но звёзды находятся на разных расстояниях от нас, и по их видимому блеску ничего нельзя сказать об их светимости или абсолютной звёздной величине. Как же удалось установить, что звёзды имеют разную светимость?

Для этого можно воспользоваться двойными системами — ведь обе звезды двойной заведомо находятся от нас на одинаковом расстоянии. Поэтому если нам кажется, что одна из них ярче другой, это значит, что она мощнее.

В двойной системе мы можем сравнивать только две звезды, а в звёздных скоплениях — тысячи. Ближайшие к нам скопления звёзд — это Плеяды и Гиады. В каждом скоплении сотни звёзд, и все они находятся примерно на одном и том же расстоянии от нас. Прекрасная возможность исследовать различия в светимости между звёздами! Этой возможностью впервые воспользовался датский астроном Эйнар Герцшпрунг в начале XX в. Для звёзд скоплений Плеяды и Гиады он построил две одинаковые диаграммы — зависимость видимой звёздной величины от температур звёзд (реально он пользовался не температурой, а прямо наблюдаемой степенью голубизны звёзд).

Через несколько лет, независимо от Герцшпрунга, американский астроном Генри Рессел начал строить аналогичные диаграммы для звёзд, находящихся на известных расстояниях. Теперь эти диаграммы называются диаграммами Герцшпрунга—Рессела. Среди сотен различных типов диаграмм, построенных астрономами за последние 100 лет, самой знаменательной оказалась диаграмма Герцшпрунга—Рессела (рис. 45).

Уже на первых диаграммах, построенных Ресселом и Герцшпрунгом, было заметно, что звёзды не «разбредаются» по диаграмме, а собираются «стадами» вдоль некоторых линий. Подавляющее число звёзд вытянулось вдоль диагональной линии, называемой главной последовательностью. Туда же, кстати, «прибилось» и наше Солнце. От главной последовательности отделяется горизонтальная ветвь звёзд гигантской светимости. Звёзды образовали искаженную букву «у». «Стадный инстинкт» явно указывал на то, что между спектральным классом и светимостью звезды существует определённая — хотя и не однозначная — зависимость.

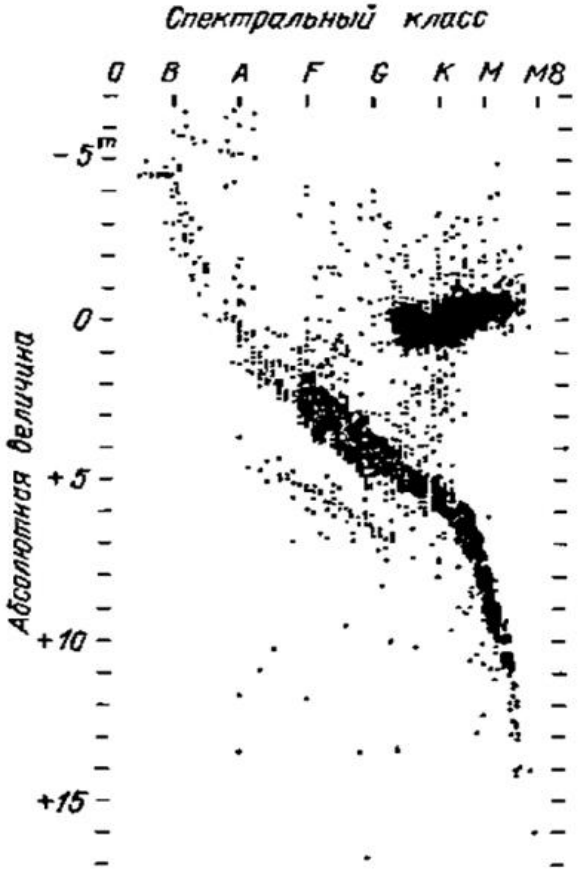


Рис. 45

Таинственная диаграмма стала ясной лишь после того, как была построена теория внутреннего строения и эволюции звёзд. Эта теория (о ней рассказывается дальше) объяснила, почему большинство звёзд группируются на главной последовательности и почему вообще существует главная последовательность. Главная последовательность представляет собой геометрическое место точек, в которых звёзды проводят наибольшее время. Чем меньше масса звезды, тем она холоднее и тем меньше её светимость. Но звезды не вечно «сидят» на главной последовательности. Рано или поздно они сходят с нее сначала в область субгигантов, потом — гигантов и т. д.

Теория эволюции звёзд показывает, что чем больше масса звезды, тем меньшее время она проводит на главной последовательности. Звёзды типа Солнца живут на главной последовательности миллиарды лет, а голубые О—В звёзды — в сотни раз меньше. Другими словами, чем массивнее звезда, тем быстрее она сгорает. А сама главная последовательность соответствует последовательности звёзд равной массы (массы голубых звёзд больше, чем красных). Массы самых холодных звёзд примерно в 10 раз меньше $M_{\odot}$, а горячих — в десятки раз больше $M_{\odot}$. Значит, для подавляющего числа звёзд в Галактике их различия обусловлены различиями в массах.

Звёзды, чайники и горящие болота

Линия, вдоль которой движется звезда на диаграмме Герцшпрунга—Рессела, называется эволюционным треком. Первым, кто включил в расчёты внутреннего строения звёзд ядерные реакции, был



Рис. 46

О эти звёздные стада,
Кто гонит вас туда-сюда?

американский астроном Мартин Шварцшильд. Эти расчёты дали ответ на вопрос к следующему шуточному рисунку (рис. 46).

Вначале звезда немного «проползает» вверх по главной последовательности. Изменения её светимости и температуры при этом связаны с медленным изменением химического состава ядра звезды — водород превращается в гелий. Постепенно весь водород выгорает. Сначала это происходит в центре звезды, где плотность и температура максимальны. Образуется гелиевое ядро. Температура в ядре недостаточна для загорания гелия, но вокруг ядра водород продолжает гореть в шаровом слое. Такой режим называется горением в слоевом источнике. Гелиевое ядро оказывается внутри источника энергии, и в нём устанавливается постоянная температура. Поэтому такое ядро называют изотермическим. Образование слоевого источника вызывает увеличение потока энергии от центра. Оболочка звезды вокруг слоевого источника начинает бурлить наподобие кипящего чайника.

Аналогия с кипением довольно глубокая. В чайнике в определённый момент начинается бурление (или, по научному, конвекция), потому что теплопрово-

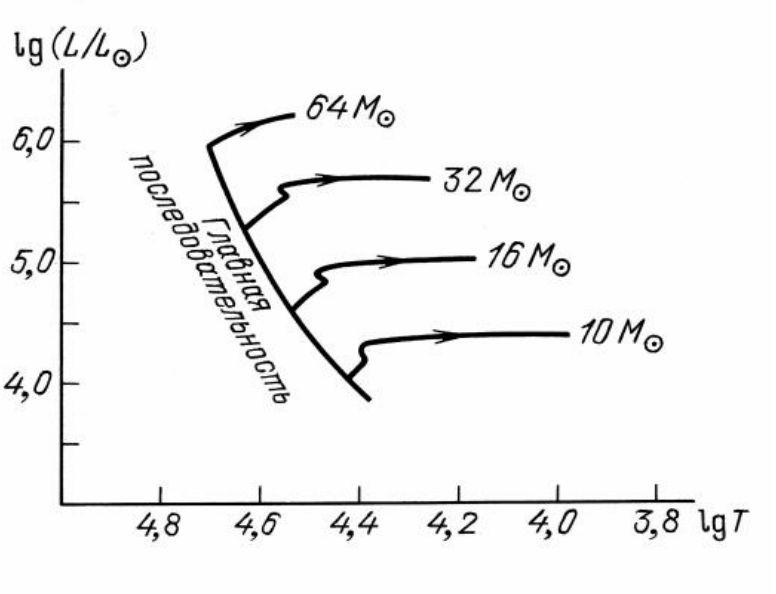


Рис. 47

дность оказывается недостаточной для переноса тепла, поступающего со дна. Динамически конвекция наступает следующим образом. Горячая вода начинает всплывать со дна под действием силы Архимеда — ведь она легче холодной. Неустойчивость тяжёлой жидкости, находящейся над лёгкой, называется неустойчивостью Релея—Тейлора.

Образование слоевого источника приводит к образованию конвективной оболочки. Звезда при этом расширяется. На диаграмме Герцшпрунга—Рессела это выглядит как уход звезды с главной последовательности в направлении гигантов и сверхгигантов (рис. 47).

Видели ли вы, как горит торф на болотах? Огня не видно, только лёгкий дым. Торф горит в небольшом кольцевом слое. Слой постепенно расширяется, оставляя внутри себя все увеличивающееся и увеличивающееся жёлтое пятно жухлой травы.

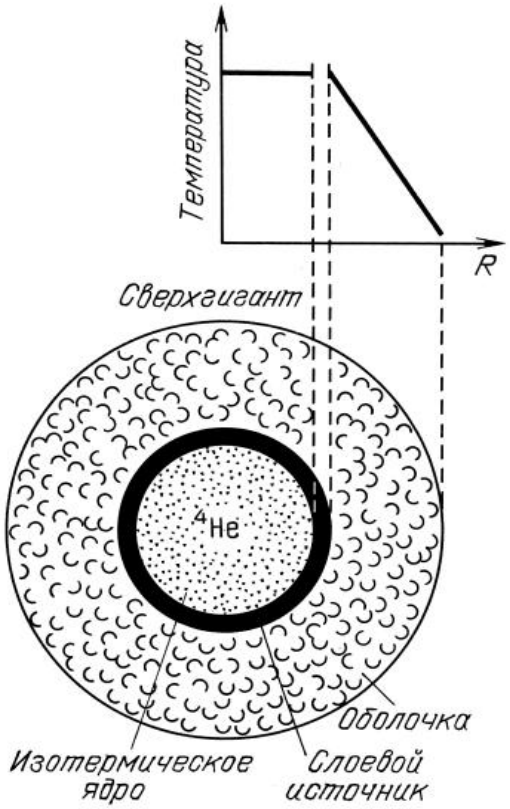


Рис. 48

Так и в звезде (рис. 48). По мере горения масса гелиевого ядра всё увеличивается и увеличивается. Ядро становится настолько большим, что не в состоянии уже сдержать свою массу и начинает сжиматься.

Дальнейшая судьба звезды зависит от её массы. У звёзд большой массы температура в гелиевом ядре поднимается настолько, что начинается синтез гелия в углерод. Эта реакция идёт путём тройного объединения трёх ядер атомов гелия (α–частиц), поэтому её иногда называют «три альфа-реакцией». Ее, кстати, придумал Фред Хойл.

У звезды могут быть два, три и более слоевых источника. У звёзд с массой больше 10 масс Солнца ядерный синтез доходит до элементов группы железа. Внешне такая звезда выглядит как голубой сверхгигант. При этом радиус звезды увеличивается в 100 раз и достигает в некоторых случаях тысяч радиусов Солнца. Чтобы почувствовать эти размеры, можно сказать, что если бы такую звезду поместить вместо Солнца, Земля очутилась бы глубоко внутри неё (расстояние от Земли до Солнца равно 214 радиусам Солнца). Какова же дальнейшая судьба звезды?

Ядерная эволюция

Перегорание водорода в гелий — необратимый процесс. Запасы водорода в звезде ограничены. Термоядерные реакции могут идти только при достаточно высокой температуре и плотности. В центре Солнца плотность вещества достигает 100 г/см^3. Реально в качестве топлива для звёзд может служить только центральная их часть с массой, составляющей 10 % полной массы. Подсчитаем, на сколько времени хватит Солнцу ядерного топлива.

Полная энергия Солнца $Mc^2 = 10^{47}$ Дж, ядерная энергия ($E_{яд}$) составляет примерно 1 %, т. е. 10^{45} Дж, и с учётом того, что не всё вещество может сгореть, получится 10^{44} Дж. Разделив эту величину на светимость Солнца $L = 4 \cdot 10^{26}$ Дж/с, получим, что его ядерной энергии хватит на 10 млрд лет. Этого вполне достаточно, чтобы не вступать в противоречие с геологическими данными о возрасте Земли. Но, с другой стороны, это означает, что звёзды не вечны: они эволюционируют. Постепенное выгорание легких элементов в звёздах определяет их ядерную эволюцию. А время выгорания называют ядерным временем; оно определяется как

$$t_{яд} = \sim E_{яд}/L = 10^{10}\,(M/M_{Солнца})^{-2} \text{ лет.}$$

Зависимость ядерного времени от массы звезды может быть получена, если учесть, что ядерная энергия звезды $E_{яд} \sim Mc^2$, а светимость ведёт себя примерно как $L \sim M^3$. Подчеркнём, что правая часть формулы — это лишь грубое приближение. Чем больше звезда, тем быстрее она себя сжигает!

Вспомним теперь диаграмму Герцшпрунга—Рессела. Большинство звёзд группируется вдоль главной последовательности. Это звёзды, в центре которых происходит ядерное горение водорода. Именно водорода. Загорание более тяжелых элементов происходит при более высокой температуре (для них больше потенциальный барьер) и сопровождается уходом звезды с главной последовательности.

Соотношение трёх характерных времен — динамического, теплового и ядерного — определяет характер эволюции звезды. То, что динамическое время много меньше теплового и ядерного, означает, что если звезду тряхнуть, она очень быстро приходит в гидростатическое равновесие. А то, что тепловое время меньше ядерного, — что звезда всегда успевает прийти и в тепловое равновесие, т. е. в равновесие между количеством энергии, выделяемой в центре в единицу времени, и количеством энергии, излучаемой поверхностью звезды (светимостью звезды). В Солнце каждые 30 млн лет обновляется запас тепловой энергии. Но энергия в Солнце переносится излучением. Значит, фотонами. Фотон, рождённый в термоядерной реакции в центре, на поверхности появляется через тепловое время, равное примерно 30 млн лет. Если бы источники термоядерной энергии «выключились» сегодня, то Солнце продолжало бы светить ещё миллионы лет.

При горении водорода рождаются не только фотоны, но и нейтрино. Нейтрино беспрепятственно выходят из Солнца со скоростью света за время, равное 700 000 км : 300 00 км/с = 2,3 с (радиус Солнца в световых секундах). Но ведь фотон тоже движется со скоростью света, а затрачивает 30 млн лет?! Конечно,

всё дело в том, что фотон, постоянно поглощаясь и переизлучаясь, сильно запутывает свою траекторию, так что её длина становится равной 30 млн световых лет (расстояние до далеких галактик) (рис. 49). Фотон как радиационно-доминированная Вселенная, и как подвыпивший путник, заблудившийся в лесу, выползает из звёздных недр по закону «корень из t». За такое большое время излучение успевает прийти в тепловое равновесие с веществом, по которому оно движется. Поэтому спектр звёзд и близок к спектру чёрного тела.

Теория внутреннего строения звёзд главной последовательности, построенная к началу 30-х гг. Эддингтоном, полностью объяснила их наблюдаемые свойства.

Но на диаграмме Герцшпрунга—Рессела строятся величины «светимость — спектр», которые являются функцией масс звёзд. Значит, для окончательного подтверждения теории необходимо было взвесить звёзды. Здесь на помощь пришли двойные системы. Используя результаты фотометрических и спектраль-

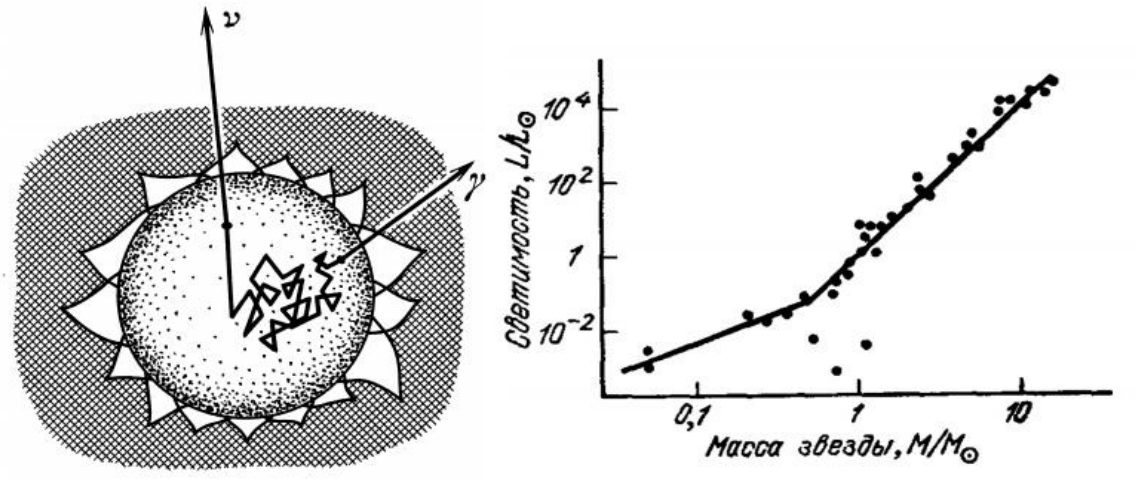


Рис. 49

ных наблюдений двойных, удалось определить массы многих сотен звёзд и связь их со светимостью. Эта связь оказалась в прекрасном согласии с теорией. Но почему некоторые звёзды на диаграмме Герцшпрунга—Рессела не подчиняются главной последовательности?

Теория Эддингтона великолепно объясняла положения звёзд на диаграмме Герцшпрунга—Рессела. Задавая массу звезды и её химический состав, можно было получить все наблюдаемые характеристики: светимость, радиус, температуру поверхности и т. д. Но всю эту прекрасную картину портила одна невзрачная звездочка 40 Эридана В. На диаграмме Герцшпрунга—Рессела она располагалась значительно ниже и левее звёзд главной последовательности. Для своей высокой температуры она имела слишком маленькую светимость, а, следовательно, и слишком малые размеры. Это никак не укладывалось в теорию Эддингтона.

Выход был найден английским физиком Р. Фаулером в 1926 г. Это было время удивительных физических открытий. В 1925–1927 гг. немецкие физики Вернер Гейзенберг и Эрвин Шрёдингер создают квантовую механику. В 1927 г. Гейзенберг сформулировал принцип неопределенности, гласящий, что мы не можем абсолютно точно одновременно знать значения координаты и скорости элементарной частицы. Вольфганг Паули в эти же годы формулирует принцип запрета, согласно которому два электрона не могут находиться в одном квантовом состоянии. Энрико Ферми и Поль Дирак исследуют фундаментальные свойства материи с учётом квантово-механических принципов и специальной теории относи-

тельности. Эти новые открытия показали, что при определённых условиях вещество перестаёт вести себя обычным образом.

Теория Эддингтона предполагает, что вещество звезды — это идеальный газ, т. е. газ, подчиняющийся уравнению

$$p = \rho RT/\mu,$$

где p и ρ — давление и плотность вещества, соответственно, μ — молярная масса. В таком виде определение годится и для плазмы, в которой нет и в помине никаких молекул. У полностью ионизированной водородной плазмы молярная масса с большой точностью равна 0,5. На каждые две частицы (электрон и протон) приходится только масса протона (масса электрона в 1800 раз меньше).

Классическое условие идеальности газа состоит в том, чтобы размеры частиц были много меньше длины свободного пробега. Помните, в первой главе мы задумывались над вопросом, почему окружающие нас предметы имеют плотности, близкие к 1 г/см^3? Плотность воды, например, просто равна 1 г/см^3. Давайте попытаемся ответить на этот вопрос.

Если охлаждать окружающие нас тела, то плотность их практически не изменится. Это означает только одно, а именно то, что эти вещества уже настолько охладились, что частицы, их составляющие, пришли в соприкосновение и дальнейшее охлаждение не приводит больше к сжатию. Да, в таком холодном мире мы живём. Плотность окружающих нас тел — это плотность атомов, из которых они состоят. Атом водорода имеет массу 10^{-24} г, а его размер — 10^{-8} см. Разделим массу на куб размера — объём,

получим 1 г/см^3! Значит, в твёрдых и жидких телах атомы и молекулы упакованы настолько плотно, что ни о какой идеальности не может быть и речи. Найдём среднюю плотность Солнца. Разделив массу Солнца ($2 \cdot 10^{33}$ г) на объём $(7 \cdot 10^{10})^3$ см^3, получим 1,4 г/см^3. Вещество Солнца плотнее воды, однако его с большим запасом можно считать идеальным газом. Почему?

Вспомним определение идеальности. Длина свободного пробега должна быть много больше размеров частиц. Длина свободного пробега равна произведению среднего промежутка времени между последовательными столкновениями на скорость частицы. С увеличением плотности время между столкновениями уменьшается, из-за этого уменьшается и длина свободного пробега. Но если с увеличением плотности увеличивать и скорость частиц, то длина свободного пробега может не только уменьшаться, но даже расти. Мы знаем: скорость движения растёт при увеличении температуры. В этом-то всё и дело! Вещество Солнца нагрето настолько, что даже при плотности более 1 г/см^3 оно остается идеальным газом (точнее, плазмой). Однако ясно, что если мы начнём мысленно сжимать Солнце, не сильно повышая его температуру, условие идеальности рано или поздно нарушится.

При сжатии условие идеальности нарушится гораздо раньше ещё и по другой причине. Интересно, что в самом конце прошлого века К. Э. Циолковский высказал идею о том, что при сжатии Солнца его вещество может перейти в новое состояние, не описываемое уравнением идеального газа. Рассматривая сжатие звёзд в результате излучения, он предположил, что при определенной плотности сжатие может

остановиться за счёт отклонения от идеальности. Но, конечно, он не мог предвидеть, что причиной этого станут законы квантовой механики. Как впервые отметил Р. Фаулер, при сжатии звезды всего лишь в 10–100 раз важную роль начинает играть расталкивание электронов за счет принципа запрета Паули. При плотности 10^5–10^8 г/см^3 протоны и ионы настолько близко находятся друг от друга, что их атомные уровни объединяются. При этом объединяются электроны, образуя своеобразный газ, который называют вырожденным. Применив уравнение состояния вырожденного электронного газа, Р. Фаулер нашёл, что размеры таких звёзд должны быть порядка 5000–10000 км, т. е. порядка размеров планет. Так было объяснено противоречие у звезды 40 Эридана B и других звёзд такого типа. Эти звёзды назвали белыми карликами.

В центре звёзд с массой меньше $3M_\odot$ «вызревает» гелиевое ядро, которое, сжимаясь, превращается в гелиевый белый карлик. При сжатии выделяется гравитационная энергия, она нагревает оболочку, и та охлаждается, т. е. расширяется и рассеивается в виде кольцеобразной туманности. Возможно, именно так образуются планетарные туманности. Пример такой туманности можно увидеть на фотографии туманности Улитка, сделанным телескопом-роботом МАСТЕР, расположенным в ЮАР. В центре туманности, как правило, находят очень горячую и компактную звёздочку (остывающее гелиевое ядро?).

У звёзд больших масс температура в центре достаточна для термоядерного синтеза более тяжёлых элементов. Если масса звезды меньше $8M_\odot$ (цифра примерная), то в ней «вызревает» ядро, состоящее из

углерода и кислорода. Сжатие такого углеродно-кислородного ядра, если его масса близка к чандрасекаровскому пределу, происходит не столь безобидно, как если бы оно состояло из гелия. В центре звезды поджигается углерод, и по звезде медленно распространяется волна горения. Этот процесс хорошо известен специалистам по взрывчатым веществам. Он называется дефлаграцией. В некоторый момент нарушается гидростатическое равновесие, звезда начинает пульсировать с всё возрастающей амплитудой. Такая раскачка может привести к взрыву и полному разлёту белого карлика. Энергия этого взрыва сравнима с энергией вспышки сверхновой. Разорвавшаяся звезда снабжает межзвёздный газ тяжелыми химическими элементами, которые потом войдут в состав новых звёзд, новых планетных систем, где возможно возникнет разумная жизнь. *(См. вклейку 23)*

Наконец, в звёздах с массами (8–10)$M_{\odot}$ углерод полностью выгорает и образуется ядро, состоящее из целого набора элементов — кислорода, неона, магния. Впоследствии эти ядра остывают и превращаются в белые карлики. Лишнее вещество «тихо» рассеивается в виде планетарной туманности.

Нейтронные звёзды

Вырожденный газ обладает удивительным свойством: его давление не зависит от температуры, а определяется только плотностью: $\boldsymbol{P} \sim \boldsymbol{\rho}^{5/3}$. Как бы ни остывал белый карлик, он никогда не сожмётся. Уравнение состояния белого карлика приводит к необычной зависимости его радиуса от массы. Эту зависимость легко получить.

Разрежем мысленно звезду, как арбуз, на две половинки. Давление сил гравитации определяется силой притяжения половинок, делённой на площадь их соприкосновения

$$P_{\text{гравитации}} \approx (GM^2/R^2)/\pi R^2 \sim M^2/R^4 ,$$

а давление газа — как

$$P \sim \rho^{5/3} \sim (M/R^3)^{5/3} \sim M^{5/3}/R^5 .$$

В равновесии оба давления должны быть равны. Значит, $R \sim M^{-1/3}$: чем больше масса карлика, тем меньше его радиус и тем больше его плотность. Но при возрастании плотности возрастает энергия электронов. Как известно, электроны в атоме стремятся занять самые нижние уровни. Так же и в электронном газе. Но в вырожденном электронном газе все нижние уровни заняты, а на занятый уровень электрону нельзя попасть из-за принципа Паули. Если мысленно увеличивать массу белого карлика, то будет расти его плотность. Электроны будут «упаковываться» все плотнее, но нижние полки заняты, и им приходится занимать самые верхние, где энергия велика. Постепенно энергия электронов становится сравнимой с их энергией покоя $m_e c^2$. Электронный газ становится релятивистским. А сжимаемость релятивистского газа гораздо лучше, чем нерелятивистского. Для него давление $P \sim \rho^{4/3}$, т. е. $P \sim (M/R^3)^{4/3} \sim M^{4/3}/R^4$. Газовое давление при сжатии растёт так же, как и давление сил гравитации! Это означает, что равновесие белого карлика возможно лишь при одном и только одном значении массы. Это критическое значение массы, оказалось примерно равным $1{,}5M_{\odot}$, называют пределом Чандрасекара. Оно было получено двадцатилетним

индийским физиком Субраманьяном Чандрасекаром в 1931 г. В 1983 г. за цикл работ по теории белых карликов С. Чандрасекар был удостоен Нобелевской премии по физике (рис. 50).

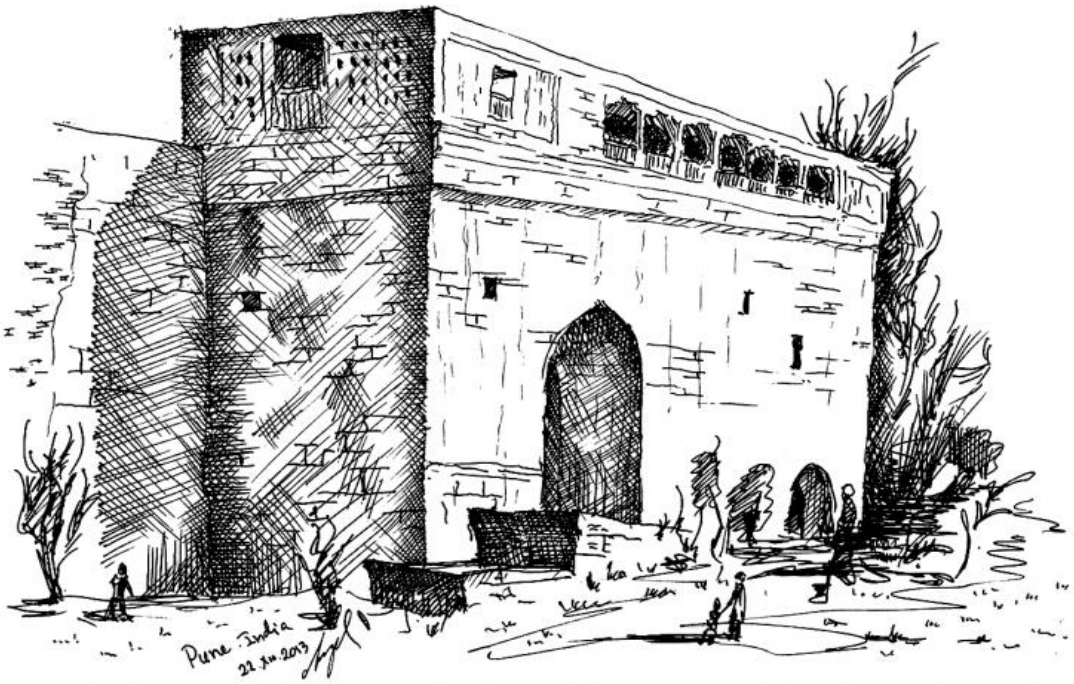


Рис. 50. «Придел Чандрасекара»[91]. Корпус имени С. Чандрасекара в астрофизическом центре г. Пуна. Индия. Рисунок автора.

При массе больше чандрасекаровского предела давление электронного газа не способно противостоять силам гравитации, и белый карлик сжимается. Независимо от Чандрасекара этот предел был получен советскими физиками Я. И. Френкелем и Л. Д. Ландау. Л. Д. Ландау в своей работе 1932 г. предположил, что звёзды с массой больше критиче-

[91] Здесь автор обыгрывает русское слово «придел» к храму современной науки.

ского предела сжимаются до тех пор, пока их ядра не придут в соприкосновение и не образуется одно гигантское ядро. Ландау писал свою работу, за год до открытия нейтрона, физики не знали, что при слиянии протонов и электронов образуются нейтроны. А буквально через год американские астрономы Вальтер Бааде и Фред Цвикки выдвинули гипотезу о том, что вспышка сверхновой звезды есть результат схлопывания обычной звезды в звезду, состоящую из одних нейтронов. Такие звёзды были названы нейтронными звёздами. Плотность нейтронов в них близка к ядерной: 10^{13}–10^{15} г/см^3. Это означает, что размер нейтронной звезды, где все нейтроны плотно прижаты друг к другу, в $(10^{15}/1)^{1/3}$ раз меньше размера Солнца, средняя плотность которого близка к единице. Радиус нейтронной звезды получается порядка ~10 км. При этом её масса больше массы Солнца!

Нейтронные звёзды рождаются в конце эволюции звёзд с первоначальной массой более $\mathbf{10}\boldsymbol{M}_{\odot}$. Большая масса нужна звезде для того, чтобы по мере выгорания лёгких элементов хватило температуры для поджигания более тяжёлых элементов. В этих звёздах сгорает всё дотла, т. е. до железа. Дальнейший синтез ядер уже не выделяет, а наоборот, поглощает энергию. Поэтому, начав сжиматься, железное ядро уже не может остановиться.

Выделяющаяся гравитационная энергия расходуется на синтез более тяжёлых элементов, и сжатие звезды становится катастрофическим. Такой процесс называется коллапсом. Во время коллапса выделяется столь большая энергия, что вся массивная оболочка сбрасывается со скоростью в несколько десятков тысяч километров в секунду. Это, по-видимому, и на-

блюдается как взрыв сверхновой. Гипотеза Бааде и Цвикки была великолепно подтверждена в 1968 г., когда в Крабовидной туманности (остатке вспышки сверхновой) был обнаружен радиопульсар.

Излучение радиопульсара приходит к нам в виде строго периодической последовательности узких импульсов. Кривая блеска радиопульсара напоминает старую расчёску с редкими зубьями. На схеме показана запись радиосигнала от открытого одним из первых пульсара PSR 0329 + 54.

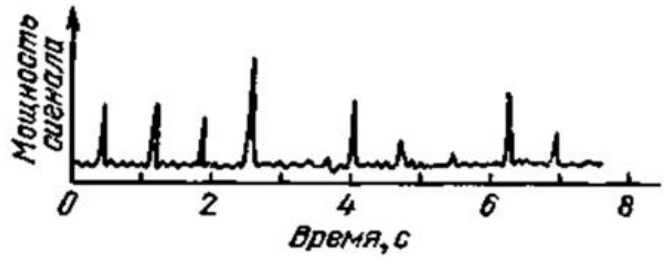


Рис. 51

Зубья (импульсы) могут следовать один за другим, а могут и пропадать, но появляются они только в строго определённых местах (в определённые моменты времени). В расчёске такое «фатальное поведение» — результат технологии её производства (машина штампует зубья, равноотстоящие друг от друга). А вот что поддерживает строгую периодичность пульсара? Оказывается, вращение нейтронной звезды. Но вращаться с периодом 0,033 с может только нейтронная звезда. Любую другую звезду разорвут гигантские центробежные силы.

Американский астрофизик Томас Голд первым понял, что радиопульсары — это нейтронные звёзды, в которых источником энергии излучения является их вращение, а магнитное поле нейтронной звезды явля-

ется тем передаточным ремнём, который «выуживает» эту энергию из нейтронной звезды. Магнитное поле нейтронной звезды, подобно полю Земли, имеет дипольный характер. Это означает, что в нём есть выделенная линия, проходящая через магнитные полюса.

Вдоль этой линии выбрасываются потоки релятивистских частиц и излучения.

Пульсар, подобно вращающемуся прожектору, «освещает» космос. Периодически луч «чиркает» по Земле, и тогда мы воспринимаем импульс излучения. Но излучая, пульсар должен замедлять свое вращение — это и наблюдается. Периоды радиопульсаров постепенно увеличиваются. На рисунке 52 можно видеть изменение периода радиопульсара в созвездии Парусов. Но почему нейтронные звёзды столь быстро вращаются и обладают столь мощными магнитными полями? Быстрое вращение и мощные магнитные поля — это такой же след («родимое пятно») процесса рождения нейтронных звёзд, как и Крабовидная и подобные ей туманности. Разница только в том, что туманность рассеивается и перестаёт быть видимой за несколько десятков тысяч лет, а вращение и магнитное поле сохраняются многие миллионы лет!

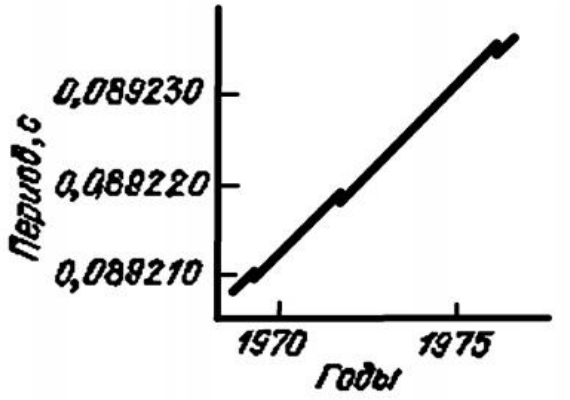


Рис. 52

Удивительные свойства пульсаров не оставляют сомнений в том, что нейтронные звёзды рождаются при схлопывании обычных звёзд. Точнее, железных ядер звёзд. Железное ядро, вызревшее в центре массивной звезды, может иметь массу больше чандрасекаровского предела. Оно коллапсирует, выделяя гигантскую энергию за счёт работы сил тяготения. Этой энергии хватает и на сброс массивной оболочки звезды (образование туманности — остатка сверхновой), и на усиление её магнитного поля, и на ускорение её вращения.

Самой трудной здесь остается проблема сброса оболочки звезды. При сжатии железного ядра звезды ядра атомов вдавливаются друг в друга и идёт процесс нейтрализации вещества, протон p^+ соединяется с электроном e^-, образуя нейтрон n:

$$p^+ + e^- \rightarrow n + \nu.$$

При этом выделяются нейтрино ν. Они-то и уносят энергию. Плотность здесь так велика, что даже нейтрино с их всепроникающей способностью не могут прямо выйти из звезды. Нейтрино начинают поглощаться (например, в обратных реакциях), отдавая свой импульс. Возникает мощное нейтринное давление. Астрофизики полагают, что именно в результате этого давления и сбрасывается оболочка звезды. Существование же нейтронных звёзд подтверждает эту картину.

Но в определенных случаях оболочка не сбрасывается. Ну и что, скажет читатель, образуется массивная нейтронная звезда. Но в том-то и дело, что массивных нейтронных звёзд не бывает.

Чёрные дыры

Точно так же, как белые карлики не могут иметь массу больше чандрасекаровского предела, так и нейтронные звёзды не могут быть сколь угодно большими[92]. Впервые это понял Георгий Гамов в 1937 г. А через 2 года, в 1939 г., американские физики Оппенгеймер и Волков. К сожалению, точное значение предела Оппенгеймера—Волкова до сих пор не определено. Связано это с тем, что мы не знаем точно, как ведёт себя вещество при плотностях, больших ядерной. Приближенно этот предел сейчас оценивается как $(2–3)M_{\odot}$. В звезде с большей массой никакое давление не сможет противостоять силам гравитации. Она коллапсирует, образуя чёрную дыру.

В прошлом веке великий французский учёный Пьер Лаплас[93] на основе теории тяготения Ньютона выдумал «чёрные дыры». Название, правда, появилось лишь в наше время. Рассуждения Лапласа были крайне просты, но результат их был совершенно неожиданным.

Чтобы в свободном полёте покинуть поверхность притягивающего тела, нужно развить начальную скорость, равную второй космической скорости

$$v = \sqrt{2\,\frac{GM}{R}}$$

[92] Недавно известный итальянский физик Ремо Руффини подсказал мне, что первое детальное исследование нейтронных звёзд принадлежит Георгию Гамов — соратнику Ландау по великой Джаз-банде.

[93] Сами понимаете, что по теореме Арнольда и Лаплас был не первым. А первым был англичанин Джон Мичелл, предсказавший «чёрные дыры» в 1783 г., на 13 лет раньше француза Лапласа (1796).

Для Земли она равна 11,2 км/с, для Солнца — 600 км/с. Но давайте мысленно сжимать тело. Вторая космическая скорость будет расти. При некотором радиусе она достигнет скорости света. Этот критический радиус (сейчас его называют гравитационным радиусом) равен

$$R_g = \frac{2GM}{c^2}$$

Для Солнца R_g получается равным 3 км. Тело, имеющее такой радиус, не может светить — свет неспособен покинуть его поверхность.

На самом деле расчёт, проведённый нами, не верен. При размере тела порядка гравитационного радиуса ньютоновская теория описывает явление неточно. Чтобы точно решить задачу о гравитационном поле такого тела, нужно решить уравнения общей теории относительности. Это в 1916 г. сделал немецкий астроном Карл Шварцшильд (отец Мартина Шварцшильда, проделавшего первые расчёты ядерной эволюции звёзд). Интересно, что в точном решении появляется величина размерностью расстояния и формула для неё совпадает с формулой, приведённой выше. На этом аналогия с ньютоновской теорией кончается. В точном решении Шварцшильда на расстоянии, равном гравитационному радиусу, происходит нечто большее, чем просто выравнивание скорости света и второй космической скорости.

Чтобы покинуть тело, вовсе не нужно развивать вторую космическую скорость. Это требование необходимо при свободном движении. Землю можно покинуть со скоростью черепахи. Нужен не выключа-

ющийся двигатель. Так же и лапласовскую чёрную дыру можно было бы покинуть, например, по веревочной лестнице.

А вот уйти из-под гравитационного радиуса нельзя вообще никогда. Не помогут никакие сверхсильные двигатели, потому что сила гравитации становится бесконечно большой. Путь в чёрную дыру — это как анизотропное шоссе из романа братьев Стругацких «Трудно быть богом» (рис. 53). По нему можно двигаться только в одну сторону.



Рис. 53

Но на этом парадоксы теории относительности не заканчиваются. Оказывается, для нас, удалённых наблюдателей, чёрная дыра полностью никогда не образуется! Ей на это не хватает времени. В сильном поле тяжести время замедляется. Если мы будем следить за ходом часов, установленных на коллапсирующей звезде, то заметим, что они идут медленнее наших (лабораторных) часов. При приближении к гравитационному радиусу замедление времени становится бесконечно большим. Для нас звезда будет бесконечно долго сжиматься до размеров, равных гравитационному радиусу. Поэтому чёрные дыры иногда называют застывшими звёздами.

Другое дело, если нам не повезло, и мы находимся на поверхности сжимающейся звезды. За время, меньшее нескольких секунд, мы достигнем гравитационного радиуса. Ничего страшного при этом не произойдет (если до этого нас не раздавят приливные силы). Но, перейдя гравитационный радиус, мы окажемся безвозвратно потерянными для всей нашей Вселенной. Сигналы, посылаемые нами, будут падать вместе с нами в чёрную дыру. Именно поэтому поверхность радиусом R_g называют горизонтом событий.

Отцы и дети

Снесла яичко не простое, а железное.
(Два правила и одна теорема из жизни звёзд).

Уже к началу 50-х гг. XX в. стало ясно, что жизнь звёзд подчиняется двум важнейшим правилам.

Правило 1: чем больше масса звезды, тем короче время её жизни. Действительно, запас термоядерной энергии пропорционален полной энергии звезды $E \sim Mc^2$ («*Оригинальное написание формулы Эйнштейна*» — *Уфф*). Также астрономы давно установили, что светимость звёзд, в которых идёт горение водорода — а это самый долгий период в жизни — пропорциональна массе звезды в достаточно большой степени: $L \sim M^3$. Отсюда и следует, что ядерное время звезды обратно пропорционально квадрату её массы

$$t_{яд} \approx 10^{10} (M/M_{\odot})^{-2} \text{ (лет)} .$$

Зависимость масса-светимость так же объясняется в теории термоядерного синтеза. Дело в том, что

скорость термоядерных реакций экспоненциально быстро растёт с температурой. Последнее — есть прямое следствие туннельного эффекта, вероятность которого определяет скорость термоядерных реакций. А экспоненту в некотором диапазоне масс можно описать одной или двумя степенными функциями. Но показатели этих функций будут достаточно большими.

Правило 2: чем больше масса звезды, тем больше атомный номер химического элемента, из которого состоит вызревшее её ядро. Дело в том, что загорание каждого последующего химического элемента из таблицы Менделеева происходит при более высокой температуре. Например, водород горит в гелий при температурах от 10 до 20 млн градусов. А гелиевое ядро, которое возникает в центре звезды, загорается уже при ста миллионах градусов. Далее образуется углеродное ядро. Потом кислородно-магниевое. И так далее вплоть до железа. Но железо уже просто так не горит. Как видно, начиная с железа, энергия связи атомов начинает падать, и образование более тяжёлых элементов уже не даёт энергии, а наоборот — требует! Однако в маленьких звёздах эта цепочка обрывается далеко от железа. Например, наше Солнце не способно поджечь даже углерод и кислород. От Солнца, в конце концов, останется углеродно-кислородный огарок который астрономы назовут белым карликом. Это правило можно объяснить с помощью некоторой астрофизической теоремы под названием «Теорема о максимуме температуры внутри самогравитирующего равновесного тела, состоящего из идеального газа». Она формулируется так: для любого заданного наперёд количества самогравитирующего идеального

газа (хотя бы и квантового) существует верхний предел температуры в её центре. Или по-простому. Если вам выдали некоторое количество вещества, то, как бы вы его не мяли, приготавливая равновесную конфигурацию, температура в центре всегда будет меньше некоторого максимума, который тем больше, чем больше масса звезды.

Подытожим полученную информацию. Судьба звезды зависит от её начальной массы. Звёзды малых масс (меньше 2–3 масс Солнца) рождают гелиевые белые карлики (рис. 53). Чем больше масса звезды, тем более тяжёлое ядро она рождает (тяжёлое и в смысле массы, и в смысле атомного номера химических элементов).

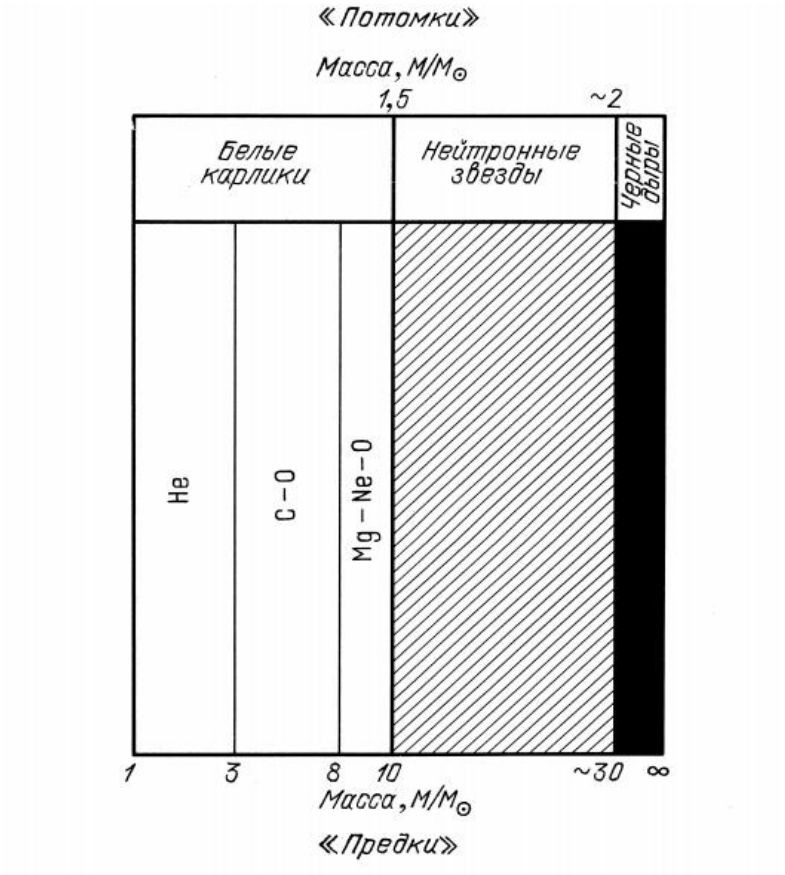


Рис. 53

Из звёзд массами до **8M**$_\odot$ образуются белые карлики, состоящие из углерода, кислорода и т. д., а в узеньком интервале от **8M**$_\odot$ до **10M**$_\odot$ рождаются кислородно-неоно-магниевые белые карлики. Массы всех белых карликов меньше чандрасекаровского предела (~1,4$M_\odot$). Интересно, что в углеродном ядре массой, близкой к чандрасекаровскому пределу, огромное выделение энергии может привести к полному разлёту ядра, и тогда от звезды ничего не останется — только вспышка сверхновой и диффузная туманность.

В звёздах массами более 10$M_\odot$ вызревают железные ядра. Эти ядра катастрофически сжимаются в нейтронные звёзды. Масса нейтронной звезды не может быть больше предела Оппенгеймера—Волкова ((2–3) $M_\odot$). Наконец, в особенно массивных звёздах возможно образование чёрных дыр.

Поэтому звёзды делят на два класса:

- массивные звёзды (> 10$M_\odot$), которые рождают нейтронные звёзды и чёрные дыры, и
- маломассивные, которые рождают белые карлики («*Страшно представить, что думают медики, читая эти строки*?!» — *Уффф*).

Так живут одиночные звёзды или двойные системы с большими расстояниями между компонентами. А что происходит в тесных двойных системах? В системах, где возможен перенос массы?

Двойные звёзды

В нашей Вселенной почти все звёзды двойные. По-крайней мере, половина уж точно. Жизнь двойной звезды намного разнообразнее, чем звезды одиноч-

ной. И связано это с тем, что в двойной системе масса звезды может не только уменьшаться, но и увеличиваться.

Особенно это важно для релятивистских звёзд — нейтронных звёзд и чёрных дыр.

Очевидно, всё, о чём мы здесь говорили, остаётся справедливым до тех пор, пока одна из звёзд не заполнит свою полость гравитационной устойчивости — полость Роша — и не начнётся обмен массой. Потеряв свою массу, звезда может превратиться из массивной в немассивную. Однако к началу обмена звезда уже «знает», какое у неё будет потомство. Тип компактной звезды определяется в значительной степени начальной массой звезды. Эту звезду и принято называть предком.

Обмен массой в массивной двойной системе спасает её от распада.

Звёздная эволюция идёт в одном направлении — к исчерпанию ядерных источников энергии. Неизбежным следствием этого должно быть образование компактных звёзд — белых карликов, нейтронных звёзд и чёрных дыр. Нейтронные звёзды и чёрные дыры образуются в результате эволюции достаточно массивных звёзд, массой не меньше $\mathbf{10M_{\odot}}$. Эти компактные звёзды можно назвать релятивистскими. Их гравитационная энергия $\boldsymbol{GM^2/R}$ сравнима с энергией покоя $\boldsymbol{Mc^2}$. У чёрных дыр почти вся энергия сосредоточена в гравитационном поле, а у нейтронных звёзд доля гравитационной энергии достигает 10–30 %.

Возможность существования нейтронных звёзд и чёрных дыр выяснилась еще в 30-е гг. Но в течение 20–30 лет (вплоть до начала 60-х гг.) после этого пред-

сказания вопрос об экспериментальном их обнаружении вообще не ставился. С чем это связано? И что изменилось в 60-е годы?

«Эм с точкой»

Всё дело в размерах нейтронных звёзд и чёрных дыр. При звёздной массе их радиус измеряется всего лишь десятками километров. Светимость нагретого тела пропорциональна площади излучающей поверхности и четвёртой степени температуры (по закону Стефана—Больцмана). Площадь поверхности нейтронной звезды, имеющей радиус 10 км, в $(700000/10)^2$ = 5 млрд раз меньше солнечной. Значит, при одинаковой с Солнцем температуре нейтронная звезда была бы в 5 млрд раз слабее. Такое различие в яркости соответствует 24 звёздным величинам. Абсолютная звёздная величина (звёздная величина с расстояния **32,6 св. лет = 10 пк**) была бы равна **29**. Такие слабые объекты стали доступны только современным крупным телескопам, оснащённым ПЗС-камерами. Нужно было быть большим оптимистом, чтобы искать столь слабые звёзды. Что уж говорить о чёрных дырах, которые не только не излучают, а наоборот, всё поглощают вокруг себя. Никто не хотел заниматься столь безнадёжным делом. Можно пересчитать по пальцам все работы, написанные во всем мире по нейтронным звёздам и чёрным дырам до 1960 г. Удивительно, как вообще такие работы появлялись. Например, в 1949 г. советский астрофизик С. А. Каплан написал работу, посвящённую анализу движения пробных частиц в поле тяготения чёрной дыры. Интересно, что тогда он работал в обсерва-

тории Львовского университета, телескопы которой значительно уступали лучшим зарубежным образцам.

Ситуация резко изменилась в начале 60-х гг., когда были открыты квазары и первые рентгеновские источники. Квазары — квазизвёздные объекты — выглядят в видимой области спектра как звёзды. Поражает их гигантская светимость: в 10^{13}–10^{15} раз больше светимости Солнца и в сотни и тысячи раз больше, чем светимость галактик. Галактики светят за счёт ядерных источников энергии в звёздах, а по размерам значительно превосходят квазары. Значит, в квазарах «работают» какие-то другие, более эффективные источники энергии.

В 1964 г. советский физик Я. Б. Зельдович и независимо американский астрофизик Эдвин Солпитер нашли источник энергии, который в сотни раз эффективнее термоядерных реакций. Для того, чтобы реализовать этот способ добычи энергии, необходима релятивистская звезда (гравитационное поле которой совершает работу) и окружающее её вещество («топливо»).

Пусть на поверхность звезды свободно падает окружающее её вещество. Двигаясь так же, как и пробные частицы с нулевой энергией (см. гл. I), это вещество будет попадать на поверхность со второй космической скоростью. Кинетическая энергия частиц вещества с единичной массой при этом равна $v^2/2 = GM / R$. Предположим, что вся кинетическая энергия при ударе о поверхность переходит в тепло, а потом излучается в окружающее пространство. Падение вещества под действием гравитации — аккрецию — удобно характеризовать количеством вещества, выпадающего на поверхность звезды в еди-

ницу времени. Эту величину называют темпом аккреции. Она показывает, как быстро изменяется с течением времени масса звезды. Скорость изменения какой-нибудь величины называется производной этой величины. Чтобы отличать её от самой величины, над её обозначением ставят точку. (Это обозначение, как и само понятие производной, придумал Исаак Ньютон.) Например, производная расстояния X обозначается $\dot{X}$ («икс с точкой»). Это просто скорость движения. А скорость увеличения (или уменьшения) массы звезды обозначают $\dot{M}$ («эм с точкой»). Это обозначение настолько привилось, что не хочется от него отказываться, даже в популярной книге. Оно не потребует каких-то особых знаний. Для нас достаточно понимать, что эта буква с пометкой (меченая буква) означает скорость изменения массы.

Итак, каждую секунду на поверхность звезды выпадает M кг вещества. Каждый «килограмм» имеет кинетическую энергию $\boldsymbol{GM/R}$, ($\boldsymbol{R}$ — радиус звезды). Если вся эта энергия переходит в излучение, светимость звезды будет равна

$$L = \dot{M}\frac{GM}{R}.$$

Для нейтронных звёзд $\boldsymbol{GM/R \sim (0{,}1–0{,}3)c^2}$, значит, для них $\boldsymbol{L \sim (0{,}1 —0{,}3)\, M c^2}$. Из полной энергии покоя горючего выделяется **10–30 %** энергии в виде излучения. Это примерно в **100** раз больше, чем та доля массы покоя, которая выделяется при сжигании водорода в гелий.

Но как быть с чёрной дырой, у которой нет никакой твёрдой поверхности? Падающему веществу не с чем сталкиваться.

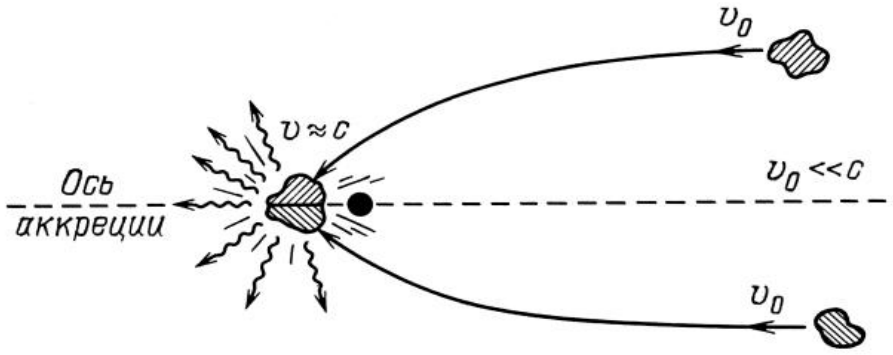


Рис. 54

Выход из этого трудного положения был найден Я. Б. Зельдовичем. Нужно «заставить» вещество сталкиваться с самим собой! Представьте себе, что две частицы симметрично падают на чёрную дыру (рис. 54), ускоряются гравитационным «ускорителем» в её гравитационном поле и сталкиваются на некоторой оси (эту ось называют осью аккреции). Столкновение нужно устроить поближе к чёрной дыре. Тогда скорости сталкивающихся частиц приблизятся к скорости света. При столкновении выделится 10 % энергии покоя частиц. Слишком близко к чёрной дыре подбираться не стоит. Выигрыш в энергии столкновения компенсируется тем, что дыра захватит на себя бóльшую часть излучения.

В своей работе 1964 г. Я. Б. Зельдович подчёркивал, что особенно мощный источник энергии может быть в двойной системе, где вторая звезда способна поставлять необходимое топливо для гравитационной машины.

Совмещение идеи аккреции релятивистской звездой с идеей двойственности привело к взрыву теоретической и экспериментальной мысли. Собственно с этим и было связано появление новой области астро-

номии — рентгеновской астрофизики. Об этом написано очень много и в том числе и мною[94].

Апофеозом и триумфом наших представлений об эволюции двойных звёзд стали два замечательных открытия гравитационных волн от сливающихся двойных чёрных дыр и нейтронных звёзд. Открытие гравитационных волн фантастически быстро — буквально через год после объявления о нём, стало причиной вручения Нобелевской премии за 2017 г.[95]

Куда стоим или как считают звёзды?

Итак, благодаря работам Георгия Гамова и Ганса Бе́те в послевоенные годы стали вырисовываться основные законы жизни звёзд. Стало ясно, что все тяжёлые элементы, которые имеются на Земле, были произведены в звёздах путём ядерного горения. Так открылся путь к объяснению химического состава нашей Галактики.

Однако на этом пути был один непреодолимый шаг. Астрономы не знали, как распределены звёзды по их массам. Ведь самые тяжёлые элементы до железа вырабатываются массивными звёздами. А «легкие» звёзды, типа нашего Солнца и меньше, способны вырабатывать только углерод и кислород. Но как найти эту загадочную функцию? Нужно было одновременно хорошо знать астрономию и ядерную физику. Такое оказалось по плечу молодому физику Эдвину Солпитеру, работавшему тогда под руковод-

---

[94] В. М. Липунов, «В мире двойных звёзд», М. Библиотечка «Квант», 1986.

[95] В. М. Липунов, «Нобелевская премия по физике 2017», Природа, стр. 65—73, N1, 2018 г.

ством Ганса Бе́те. Перефразируя известную шутку про астронома Оорта[96], можно сказать, что Солпитер первым взглянул на небо и увидел, что звёзды малой массы рождаются чаще. Иначе, почему из 6000 видимых простым глазом звёзд ярче первой величины всего несколько штук, а звёзд ярче шестой — тысячи!? Хорошего всегда мало, — скажет весёлый читатель. Это правда, но тут дело сложнее.

Когда-то, в советские времена, я придумал такую задачку про очереди в музеи и рассказывал студентам на лекциях. Но, потом очереди в музеи исчезли, и приходилось долго рассказывать студентам о старых временах, когда были очереди и не только за продуктами. А вот в последние годы очереди в картинные галереи появились снова[97]. Поэтому расскажу и вам. Кстати, московский космолог Абрам Леонидович Зельманов любил в качестве иллюстрации диалектики приводить известный вопрос к очереди: куда стоим?

Мы стоим в Третьяковку на Крымской набережной. В многочасовой очереди особо делать нечего и можно «порешать» разные задачки. Например, интересно, а как узнать количество счастливчиков, которые в данный момент уже находятся в тепле на выставке. Зайти в музей в этой задачке, как и в жизни, нельзя. Да и можно ли не заходя внутрь узнать, сколько там народу? Можно. Но при одном условии — если ситуация стабилизировалась или говоря строгим языком стала стационарной. В стационарной ситуации число

---

[96] В одной из книг братьев Стругацких можно прочитать «Оорт первым взглянул на небо и увидел, что Галактика вращается».

[97] Я сам ностальгически померз в нескольких очередях — на выставки Левитана, Серова и Айвазовского. Приятно было потолкаться в морозном московском воздухе. Жива Россия.

посетителей музея не изменяется, и, соответственно, не изменяются скорость очереди и среднее время осмотра экспозиции. Тогда, нужно сделать две вещи. Первая — нужно подойти к выходу из музея и провести небольшой социальный опрос — сколько времени вы грелись в музее? Вычислить среднее время осмотра: $t_м$. Потом, нужно вернуться к входу и спросить у людей которые вот-вот войдут, сколько они померзли в очереди $t_{оч}$. Дальше посчитайте число людей (про себя, чтобы не раздражать их) в очереди $N_{оч}$. Тогда счастливчиков будет:

$$N_{муз} = (N_{оч} / t_{оч}) t_м .$$

Теперь вернёмся к звёздам. Предположим, что ситуация в галактике давно стабилизировалась и звёзды рождаются с одинаковой частотой. Но решать мы будем обратную задачу. Мы с вами в музее ночного неба и спрашиваем себя, а как часто рождаются новенькие звёзды? В последней формуле — это величина в скобках. Скорость рождения звёзд (скорость появления людей в залах музея) $N_{оч} / t_{оч}$ — это и есть функция Солпитера. Однако в случае звёзд — звёзды — посетители музея, а мы вроде живописной экспозиции. Кроме того, нас интересует, как скорость рождения звёзд зависит от их массы. Например, слабых звёзд было на небе всегда больше, даже если бы они появлялись с той же скоростью, что и массивные. Ведь маломассивные живут в сотни раз дольше.

С другой стороны массивные звёзды значительно ярче и бросаются в глаза, если даже удалены на большие расстояния. Вот эти все эффекты пришлось учесть. Так Солпитеру удалось определить, что звёзды

с массой больше некоторой (M) появляются в нашей Галактике со скоростью

$$R\,(>M) = (M/M_{\odot})^{-1,35}\ год^{-1}.$$

Т. е., в нашей галактике звёзды с массой больше массы Солнца $M > M_{\odot}$ появляются раз в год. Конечно, мы уже подставили современные числа, полученные в результате 50 лет исследования функции распределения рождающихся звёзд по массам.

Функция рождения звёзд — важнейшая характеристика нашей Галактики — до сих пор не получила надёжного теоретического объяснения. Но пользоваться ею можно — проверена, и не только по нашей Галактике! Конечно, в других галактиках звёздообразование может идти и слабее и сильнее — но показатель степени в законе Солпитера сохраняется в пределах ошибок измерения.

Сколько планет во Вселенной?

Кабы вы знали, из какого ссора...[98]
А. Ахматова

Рассказывая об образовании звезд, мы пропустили одну маленькую деталь. А что будет, если термоядерные реакции не пойдут в звезде? Ведь по теореме о максимальной температуре — чем меньше масса вещества в звезде, тем меньше в её недрах может быть температура и, следовательно, существует минимальная масса звезды. Так вот, если масса меньше «минимальной», — образуется планета.

[98] «Кабы вы знали, из какого ссора растут стихи, не ведая стыда...» — строчка из стихотворения Анны Ахматовой.

Давайте подсчитаем минимальную массу звезды. Самая легко возгораемая термоядерная реакция — это реакция горения лития. Она начинается при температуре около 1 млн градусов. Напомним, что температура в центре самогравитирующего шарика, состоящего их идеального газа, определяется из условия равенства тепловой и гравитационной энергии $MkT/\mu \sim GM^2/R$:

$$T \approx \mu GM/RkT \sim 10^6 \text{ K}.$$

Здесь k — универсальная газовая постоянная. Поскольку масса звезды $\dot{M} = (4\pi/3)R^3\rho$, а плотность $\rho = 1$ г/см^3 получаем минимальную массу звезды или максимальную массу планеты:

$$M > M_{min} \approx 0{,}01\ M_{\odot}.$$

Если посмотреть на функцию Солпитера, то становиться ясно, что планет в нашей Галактике сильно больше чем звёзд! На самом деле — на таких малых массах, скорее всего функция Солпитера не работает.

Тем не менее, еще лет 30 лет назад, когда не было открыто ни одной экзопланеты вокруг нормальных звёзд, замечательный советский и российский астрофизик Александр Васильевич Тутуков обосновал утверждение о том, что планетных систем в нашей галактике очень много. Он даже оценил их число как ~30 % от числа звёзд — каждая третья звезда окружена своей собственной планетной системой. Но как всякий глубокий ученый не ограничился просто оценкой и тут же предложил новый метод поиска звёзд в современную эпоху — метод, который теперь называют методом транзита.

На самом деле мало кто заметил эту замечательную статью, а из тех, кто прочёл — её поняли лишь единицы. Дело не в том, что Тутуков предсказал явление транзита экзопланет. Золотое зерно его идеи кроется не в этом. Но все по-порядку — сначала о транзитах.

Астрономы давно наблюдают это явление в Солнечной системе.

Всем известно замечательное открытие Михаилом Ломоносовым атмосферы Венеры в процессе её транзита по диску Солнца — ближайшей к нам звезды. 6 июня (26 мая) 1761 г. ближайшая к Земле планета Венера встала ровно между нами и Солнцем. В результате земляне могли наблюдать ночную сторону соседки как тёмное круглое пятнышко на ярком диске Солнца. Тем временем планета Венера, двигаясь быстрее и обгоняя Землю, небольшим чёрным отверстием ползла по диску в восточном направлении. Именно это событие наблюдали десятки астрономов Европы. Но лишь Ломоносов — астроном самоучка — заметил кое-что ещё — более важное, чем явление транзита! Перед самым наездом на край Солнца призрачное бриллиантовое кольцо вспыхнуло вокруг Венеры, а сам её диск заполнился слабым мутным сиянием. О как сбивает дыхание великого мужа в момент открытия! Дрожащей рукой он пишет в своём дневнике: «... Ожидая вступления Венерина на Солнце... увидел, наконец, что солнечный край чаемого всту-

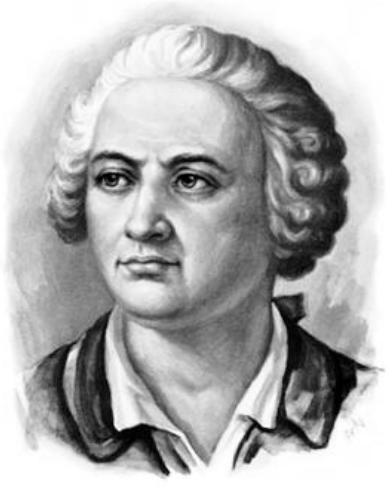


Рис. 55
Михаил Васильевич Ломоносов (1711–1765)

пления стал неявственен несколько, будто стушёван, а прежде был весьма чист и везде равен... При выступлении Венеры из Солнца, когда передний её край стал приближаться к солнечному краю... появился на краю Солнца пупырь, который тем явственнее учинился, чем ближе Венера к выступлению приходила... Сие не что иное показывает, как преломление лучей солнечных в Венериной атмосфере...».

Лев узнаётся по когтям. Это было первое научное открытие Михаила Ломоносова. Это открытие уровня современной Нобелевской премии — было лишь первым в ряду более фундаментальных открытий. Любовь к звёздному небу, привитая юноше архиепископом Афанасием Холмогорским[99], вознесла его на научный олимп своего века. Ломоносов был не просто гением — а ещё и очень умным, проницательным человеком. Это его ответ многим пересмешникам, издевавшимся над русским гением в духе «Россия — родина слонов».

Итак, явление транзита в Солнечной системе известно астрономам несколько столетий. Но почему же оно не может происходить в других планетных системах, если таковые действительно существуют, — спросил себя Александр Тутуков. Конечно, могут. Более того они могут продемонстрировать само существование других планетных систем. Конечно, наблюдать диски других звёзд, да ещё и планетные пятнышки на них — нереально. Но вот слабое понижение блеска вполне реально. Например — самая большая планета солнечной системы — Юпитер — всего в 10 раз

[99] Первый архиепископ Холмогорский и Важеский, в миру — Алексей Артемьевич Любимов (1641–1702).

меньше по размеру Солнца. Это значит, что далёкий экзо-Юпитер может «перекрыть» на несколько процентов блеск звезды-хозяйки в момент прохождения по его диску. Конечно, этот момент растянут по времени — это несколько часов. Но поймать случайный транзит у случайной звезды — это же нереально! Кто будет сидеть днями и ночами, и ждать случайного транзита («*Да особенно днями*» — *Уфф*)? Да и у какой именно звезды? Ведь, кроме того, что у этой звезды должна быть планетная система, её плоскость должна лежать в плоскости луча зрения, чтобы планеты могли наползать на видимый землянами диск звезды!

Но весь фокус в том, что Тутуков писал свою работу в 90-е гг. — годы, когда в наблюдательную астрономию начало возвращаться утерянное на десятилетия важнейшее свойство астрономических наблюдений — панорамность! Дело в том, что во второй половине XX в. из астрономии практически были вытеснены широкопольные инструменты. Широкое поле обеспечивалось большим размером фотоприёмников — фотопластинок. Однако фотопластинки были очень «медленными», имели очень слабую чувствительность и, следовательно, малую фотометрическую точность измерения блеска звезд. Вошедшие в обиход наблюдателей фотоумножители — приборы с быстрой реакцией и достаточной точностью измерения яркости имели очень маленькие линейные размеры, так что если в поле зрения их попадало несколько звёзд, то и те сливались в одно пятнышко.

Но именно в конце прошлого века в астрономию стали проникать новые фотоприемники — ПЗС-камеры с чувствительностью почти в 100 раз большей, чем

у фотопластинок при почти такой же панорамности! В общем, в наше время мне не надо объяснять долго читателю преимущества цифровых фотоаппаратов по сравнению с плёночными. Но в 90-е гг. они только появились у самых богатых людей и в богатых институтах на Западе. Тем не менее, именно ПЗС-камеры позволяют быстро снимать большие звёздные поля с высокой фотометрической точностью, достаточной для обнаружения эффекта транзиты. Расчёты показывали, что если предположить, что у каждой звезды есть планетная система, то чтобы зарегистрировать транзит надо фотометрировать две тысячи звёзд в течение 3-х месяцев. Это вполне возможно, если сделать поле зрения в несколько сотен квадратных градусов. При этом вовсе не нужно строить огромные телескопы, а всего лишь можно использовать дюжину-другую стандартных широкоугольных объективов. Так была создана самая успешная наземная фабрика открытия планет — установка английских ученых WASP и её модификация SuperWASP[100].

Результат был ошеломляющим — для открытия одной экзопланеты требовалось всего в три раза больше времени, т. е. надо было последить за шестью тысячами карликовых звёзд типа Солнца! То есть планеты есть у каждой третьей звезды нашей Галактики — в точном соответствии с расчётами Александра Тутукова.

6 марта 2009 г. к наземным охотникам за планетами присоединилась космическая обсерватория Кеплер, которая примерно за 4 года открыла более 1000 эк-

[100] WASP — Wide Angle Search for Planets (Широкоугольный Поиск Экзопланет).

зопланет! Конечно, большинство из них были огромными газовыми гигантами типа Юпитера. Это понятно, большая планета перекрывает во время транзита больше света и её легче обнаружить. Например, экзо-Юпитер перекрывает примерно 1 % диска звезды и, следовательно, точность фотометрии должна быть не хуже 1 %. Планеты же типа Земли открывают по наводке — после того, как открыт экзо-Юпитер, крупный телескоп ищет более мелкие планеты. Что же касается экзогигантов, все они оказались совсем не там где их ждали по аналогии с Солнечной системой. Напомню, что большие планеты в Солнечной системе — Юпитер, Сатурн и Уран находятся вдали от Солнца — за поясом астероидов. И наоборот, маленькие каменные типа Земли — поближе. Так вот Большинство экзо-Юпитеров находились на орбитах Меркурия! Все это сильно усложняло картину образования планет. Стало ясно, что этот процесс крайне многообразен, весьма хаотичен и детали его будут выяснены не скоро.

Тутуков любит повторять, что планеты сделаны из мусора, который не вошел в звёзды. Почему? Скорее всего, это вещество уносит излишки вращательного момента — а нет более эффективного способа избавиться от излишков, чем выбросить небольшую массу вещества в виде планетной системы. Это связано с тем, что момент вращения пропорционален массе вещества, умноженной на скорость и «плечо»:

$$K = M_{пл}\, vR \sim M\,(GM/R)^{1/2}\, R \sim M_{пл} R^{1/2}$$

и растёт по мере удаления от центральной звезды. Именно поэтому, природа, создавая звёзды, очень рачительно использует строительный материал. Так что

мусора остаётся очень мало. Во всяком случае, в нашей Солнечной системе 99 % вещества сосредоточено именно в Солнце, а не в планетах, кометах и астероидах.

Конечно, детали процесса образования планет и планетных систем станут известны не очень скоро. Крупные наземные телескопы по наводке проектов **Кеплер** и **Wasp** установили, что кроме газовых Юпитеров почти всегда наблюдаются многочисленные планеты земного размера.

Но вот что теперь абсолютно ясно — планет в Галактике больше, чем звёзд. Сотни миллиардов планет в каждой галактике, а галактик во Вселенной десятки миллиардов. Вот и сами подсчитайте, сколько планет в нашей Вселенной.

Глава 4
Великое Молчание Вселенной

Меня страшит вечное молчание
этих бесконечных пространств.
Блез Паскаль,
«Мысли о Боге»[101]

Дорогой читатель, ты же ещё здесь! Ты, я и Петька («*А я?*» — *Ууфф*). Нас не много, тех, кто однажды вышел в степь широкую и увидел на небосклоне Вселенную. Небосвод, будто старинный театральный занавес перед началом спектакля ещё не поднялся и скрывает за собой великую тайну бытия. Мы с тревогой ждём начала этого прекрасного спектакля, яркого, блистающего наполненного фантастическими событиями. Иначе, отчего сквозь продырявленное звёздами бездонное чёрное полотно, оттуда, с той неизведанной скрытой стороны, прорывается к нам таинственный мерцающий её отблеск. («*Наш непокорный слуга, кажется, стал сентиментален*» — *Ууфф*).

Итак, мы приступаем к последней главе нашей книги, наиболее спорной, но и наиболее дорогой автору. Быть может, я так подробно описывал узловые

---

[101] Эту цитату автор дружески спёр у Юрия Николаевича Ефремова — замечательного астронома и популяризатора науки. Ведь он сам не без содрогания иногда смотрит в небо.

моменты последних 300–400 лет развития физики, чтобы читатель смог во всеоружии встретиться лицом к лицу с самым проклятым парадоксом нашего естествознания. Здесь, на минных полях неведомого, усеянных проклятыми вопросами, волнующими лучшие умы человечества последние несколько тысяч лет, надо бы быть посерьёзнее в изложении. Тут не до шуток и злопыхательств старика Ууффа. Да и с Петей все может превратиться в водевиль. Кстати, о Пете. Что там наш велосипедист? Где он там затерялся на валдайских перевалах? («*Тоже придумал, на Валдае летом комаров кормить. Валдайские думы сподручнее на черном море думать...*» — *Ууфф.*) Последние ночи ему довольно холодно и, глядя в звёздное молчаливое небо он, подобно Блёзу Паскалю, не только испытывает ужас при виде молчаливого звёздного множества, но и своей молодой тонкой кожей чувствует космическую прохладу июльской русской ночи. Правда у него есть палатка и два скачанных файла — один с моей лекцией в малом зале Политехнического Музея, другой — с текстом книги Радищева «Путешествие из Петербурга в Москву». Вот здесь, проезжая валдайские горы с чудны́ми названиями поселков, он нет-нет, да и заглянет в русскую классику — что там современник Ломоносова писал о них? Ну а сейчас, в этот самый момент, лежит он на чердаке заброшенного домишки пустеющего ныне села Яжелбицы и, ёжась, глядит в чистое небо. Петя уже слушал мою лекцию про Великое Молчание Вселенной в Интернете — ничего не понял, и теперь, слушая её, начал схватывать, почему так волнуется профессор, рассказывая о таких далёких от повседневной жизни вопросах.

Ну а что автор — ваш непокорный слуга? Вот страшно дальше продолжать («*Вижу, авторитетов даже на подмогу зовёшь...*» — *Уфф*). Да, нечего делать, ведь мы сейчас с Петей в Яжелбицах, а Яжелбицы расшифровываются так: Я Желаю Биться.

Разум как инфляционный процесс

Стивен Хокинг в своём бестселлере «История времени»[102] приводит слова Блаженного Августина — христианского богослова, жившего в начале нового времени, который указал на то, что цивилизация прогрессирует, а мы помним, кто совершил то или иное деяние и кто что изобрёл. Поэтому человечество, а значит, вероятно, и Вселенная, вряд ли очень долго существуют. Блаженный Августин считал приемлемой дату сотворения Вселенной, соответствующую книге «Бытия»: приблизительно 5000-й год до нашей эры[103] (рис. 43). *(См. вклейку 24)*

Это вам ничего не напоминает? Смотрите, человек как вид выделился в тысячу раз раньше и существовал в каком-то зачаточном состоянии около 5 млн лет, а как млекопитающее наверное ещё 100 млн лет, и как живой организм — миллиард лет). На фоне этой биологической эволюции современная цивилизация выглядит как Большой Взрыв и даже более точно, как Инфляция — экспоненциальное раздувание за одну миллионную биологического времени.

Если использовать данные о мировом количестве производимой энергии, то можно найти, что за по-

---

[102] Стивен Хокинг, «История времени».

[103] Августин Блаженный, «Град Божий»

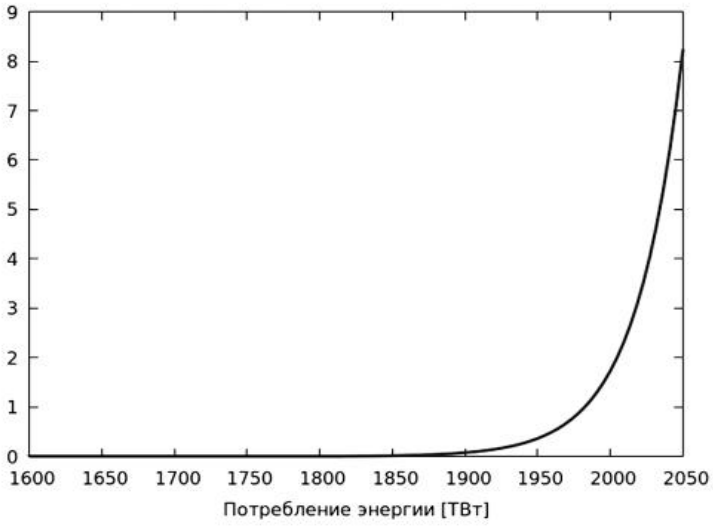


Рис. 56

следние 200 лет количество производимой энергии удваивалось примерно каждые 20 лет и в 80-х гг. составляло примерно $6 \cdot 10^{12}$ Вт = 6 ТВт (ТераВатт). При таких темпах через 200 лет оно дойдет до $3 \cdot 10^{15}$ Вт = = 3000 ТВт, а это уже существенная часть поступающей на Землю энергии Солнца (рис. 56). Получается очень крутая экспонента, которая на диаграмме развития Вселенной будет выглядеть как дельта-функция[104].

Дальнейшее увеличение производства энергии приведёт к заметному нагреву планеты и, вполне вероятно, к таким изменениям климата, что жизнь на Земле станет невозможной. Преодолеть этот «тепловой барьер» можно, видимо, только выведя в космическое пространство энергоёмкие производства[105].

---

[104] Дельта-функция, — математическая функция нулевой ширины и бесконечной высоты. При этом её площадь равна единице. Дельта-функция — не имеет ни истории, ни эволюции — это взрыв.

[105] Подробнее см.: https://www.nkj.ru/archive/articles/10817/ Журнал «Наука и жизнь».

Почему человечество развивается по экспоненте? Будем говорить конкретно об энергетических возможностях. Вообще говоря, экспонента это общий признак развития живого многообразия в неограниченной среде. Так, например, количество дрозофил на начальном этапе (пока не чувствуется ограниченность запаса гнилых яблок) подчиняется простому закону: число рождённых в единицу времени пропорционально числу особей способных откладывать яйца. Это можно записать короче $\Delta N/\Delta t \sim N$. Это означает, что за равные промежутки времени население возрастает в одинаковое число раз — геометрическая прогрессия. Получается экспонента. Экспонента замечательная функция, скорость её изменения растёт также как и она сама!

$$N = N_0 \, e^{\,t/\tau}.$$

Однако, как любил подчеркивать Зельдович, экспонента не объясняет, откуда берутся дрозофилы. Число N_0 — начальное количество насекомых — в таких уравнениях задаётся извне. В этом смысле вопрос о появлении, например, человека остается за рамками данной теории. Впрочем, как и появление Вселенной, радиус которой увеличивается по схожему закону на стадии инфляции. В этом смысле, например, закон расширения Вселенной в классической доинфляционной модели, так называемой фридмановской Вселенной, не требует акта творения. Например, на радиационно-доминированной стадии $R \sim t^{1/2}$ — Вселенная растёт от нулевого размера без вмешательства свыше.

Итак, можно констатировать, что в настоящее время в нашей Вселенной, а вернее в наших пред-

ставлениях о ней, содержится три великих экспоненты. Самая первая и быстрая — экспонента стадии инфляции. Её характерное время $t \sim t_{Пл} \sim 10^{-45}$ с, вторая это экспонента ускоренного расширения Вселенной $t \sim 1/H_0 \sim 10^{17}$ с и третья — экспонента экспансии земной технологической цивилизации $t \sim \tau = 100$ лет $= 3 \cdot 10^9$ с. Им соответствуют три постоянных Хаббла, между которыми вот такое соотношение:

$$1/H_0 << 1/H_{цивилизации} << 1/H_{инфляции}.$$

Парадокс Ферми и Число N3

Итак, наступило время самого большого числа из всех больших чисел мироздания. Вспомним, предыдущие числа **N1** и **N2**. Первое число **N1** это число, которое похоронило классическую физику, в которой пространство и время, хоть относительны, но строго детерминированы в каждой из систем отсчета. Число **N1** — это безразмерное наблюдаемое отношение времени жизни атомов (возраст Вселенной) ко времени падения электрона на ядро атома, предсказываемое классической физикой XIX в.

$$N1 = 13 \text{ млрд лет} / 10^{-8} \text{ с} = 5 \cdot 10^{26}.$$

Да, согласно классическим представлениям о природе вещей, атом не мог жить более одной стомиллионной доли секунды. А глаза наши астрономические видят невооруженным глазом их в течение миллиардов лет. Этот вопиющий «дискрипанс» («*Ну это что за физический жаргон?*» — *Уффф*) заставил нас отказаться от мира, в котором есть незыблемые вещи,

находящиеся в незыблемых местах или двигающиеся с определённой скоростью. На очереди стоит уже объяснение следующего «дискрипанса» — числа *N*2 между плотностью энергии вакуума и планковской плотностью:

$$N2 = \rho_{Планка} / \rho_{\lambda} \sim 10^{121}.$$

Трудно даже представить, от чего здесь придётся отказаться нынешней физике для его объяснения! Но оба этих великих числа меркнут перед числом ***N*3**.

Итак, я хочу сказать, что в современном естествознании есть совершенно непонятный и парадоксальный экспериментальный факт, находящийся в вопиющем противоречии со всеми современными ортодоксальными представлениями о мире, — это факт отсутствия сверхцивилизаций или факт «Великого Молчания Вселенной», факт, открытый и понятый, конечно, не сейчас. Особенно остро он был осмыслен в посмертной статье И. С. Шкловского[106], которая оказалась практически гласом вопиющего в пустыне. Вообще, сам интерес Шкловского к проблеме Внеземного Разума и особенно эволюция его взглядов на эту проблему (от оптимистического поиска «иголки в стоге сена» к задаче о «шиле в мешке») весьма поучительны. Но, поучительно и то, как молчаливо научная общественность (тоже странный парадокс: «Молчание научной общественности») обошла изложенные там идеи. И это в те времена, когда его статья шла со страшным скрипом, и когда был так велик интерес ко всему запрещённому или полузапрещённому. Ну, а если ещё подумать, так ли это уж уди-

[106] И. С. Шкловский, «Земля и Вселенная», 1985, No 3, с.76.

вительно? Ведь жило человечество вполне нормально две тысячи лет, вопреки явному несоответствию видимого движения планет и теории эпициклов и деферентов. Кроме того, есть всегда определенный риск «замараться» в такой изъезженной графоманами, тарелочниками и просто непрофессиональными людьми области, как Внеземной Разум.

На меня огромное впечатление произвела упомянутая статья И. С. Шкловского, написанная, как всегда, ясным, остроумным языком. В ней, с присущим ему популяризаторским талантом, Шкловский сформулировал мучившую его всю жизнь проблему Внеземного Разума. Но самое удивительное, что, пройдя путь от раннего романтизма 60-х (гипотеза искусственного происхождения Фобоса и Деймоса), через более реалистическую концепцию единственности жизни во Вселенной (отсутствие космических чудес[107]), он пришёл к заключению, которое могло быть получено ещё до начала космической эры и программ поиска внеземных цивилизаций! Последнее хочется ещё раз подчеркнуть. Проблема отсутствия внеземных цивилизаций никак не связана с неудачей в поисках таковых, начатых в 60-е гг. Как ясно из нижеследующего, эта проблема встала задолго до космической эры!

Под впечатлением от статьи Шкловского я написал сначала фантастический рассказ[108], а потом заметку[109] в «Астрономический журнал», где, наряду с некоторой простой оценкой вероятности контакта (о ней я расскажу чуть позже), буквально в одном абзаце

---

[107] И. С. Шкловский, Вопросы философии, 1976, No 9.

[108] Владимир Хлумов, "Кулповский меморандум", «Земля и Вселенная», 1987, No 1, с.95.

[109] В. М. Липунов, Астрон. Ж., 1988, т. 65, с. 433.

я попытался сформулировать строго научную «постановку задачи». В сущности, все сводится к парадоксу Ферми, который на современном языке выглядит так: мы имеем два наблюдательных или, если угодно, экспериментальных факта: 1) возраст Вселенной $T = 1/H_0 \approx$ **10 млрд лет** (примерно), 2) характерное время τ экспоненциального развития нашей цивилизации исчисляется десятками лет. Для простоты примем безусловно завышенную величину $\tau = 100$ лет. Т. е. каждые 100 лет экономическая мощь цивилизации возрастает в 2,7 раза. Целых сто лет! Да, ведь это всего чуть больше процента в год. «Стагнация!» — воскликнет макроэкономист, да и народ скажет, что нам не нужно такое развитие. «Долой правительство воров и негодяев» — крикнут нынешние большевики! Конечно, народ проголосует за китайские темпы развития. Да, последние несколько столетий земная цивилизация развивается экспоненциально с гораздо более быстрыми темпами. Итак, представим себе что эта «стагнация» продлилась бы 10 млрд лет.

Возникает гигантское безразмерное число, характеризующее рост технологической цивилизации за время существования:

$$N3 = \exp(T/\tau) \approx 10^{43\,000\,000}$$

— десятка с сорока тремя миллионами нулей.

С такими большими безразмерными числами теоретическая физика никогда не сталкивалась. Например, полное число элементарных частиц во Вселенной выглядит смехотворно малым — 10^{80} (десятка с восьмидесятою нулями). Не говоря уже ничего более, такое число должно насторожить любого здравомыслящего

теоретика (на своём опыте общения знаю, что на самом деле это далеко не так — видно теоретики теряют свое здравомыслие за определённой чертой). Ферми просто воскликнул[110]: «Если есть где-либо цивилизации, то их космические корабли давно уже в Солнечной системе» (не ручаюсь за точность цитаты). Ученик Шкловского — Николай Семенович Кардашёв — даже предложил классификацию типов цивилизаций, но осторожно остановился на трех: цивилизация I типа освоила планету, II типа — планетную систему, и III типа — всю галактику. Но полученное нами число $N3$ столь велико, что ваш непокорный слуга предложил говорить о научно открываемом боге[111] — сверхразуме, захватившем всю Вселенную с целью создания новых! Конечно, ведь это число настолько велико, что всякие неизвестные промежуточные коэффициенты не могут быть важны. Например, можно утверждать, что если бы цивилизации не погибали, вероятность отсутствия «Космических Чудес» в нашей Вселенной просто была бы равна 10 в степени –43 000 000, т. е. нулю! Тем не менее, их никто не обнаружил даже после 20 лет поиска, наоборот, обнаружилось Великое Молчание Вселенной. Мир без чудес невероятен, но он существует. Вот в чём парадокс...

Тупиковая ветвь

Как разрешить парадокс Ферми в рамках современного научного подхода? В середине 70-х гг.

---

[110] C. Sagan, Planet Space Sci., 1963, v. 11, p. 485.

[111] В. М. Липунов, «Научно открываемый бог», Земля и Вселенная, No 1, 37, 1995.

Шкловский сформулировал концепцию Космического Чуда как результат деятельности сверхцивилизаций, и предложил идею единственности нашей цивилизации во всей огромной Вселенной. Раз нет Космических Чудес, и Вселенная молчит, то, значит, и нет никакого внешнего Разума. Страшная это была мысль, в особенности для человека, искавшего искусственные корни внутри спутников Марса. Но и для человечества всё обстояло не лучше. Рухнула одна из самых оптимистических человеческих идей о множественности миров. Как сказал однажды в другой связи Я. Б. Зельдович «За что сгорел Джордано Бруно?»[112].

Но так ли уж естественна гипотеза единственности земной цивилизации? Да нет, конечно. Эта гипотеза сама находится в вопиющем противоречии с наблюдаемой однородностью и изотропией Вселенной, установленной благодаря открытию реликтового излучения. Представляется маловероятным возникновение лишь одной цивилизации в целом однородной и изотропной Вселенной, в ничем не примечательной Галактике вблизи обычной жёлтой звезды. В нашей Галактике таких звёзд миллиарды. А самих галактик ещё больше. Вероятность эта все-таки не столь мала и не идёт ни в какое сравнение с парадоксом Ферми, и, конечно, встаёт вопрос о количестве планетных систем, и всплывает известная формула Дрейка. Но всё-таки гипотеза единственности опять возвращает нас на антропоцентрическую точку зрения, от которой физика всегда старается быть подальше.

[112] Кстати, Джордано Бруно был сожжен святой папской инквизицией вовсе не за гипотезу множественности миров. Просто не сошлись во взглядах на святую троицу.

Кроме того, как мы увидим ниже, в свете парадокса Циолковского, о котором мы поговорим дальше, эта идея и сопутствующие ей расчёты вероятности возникновения жизни, попросту теряют актуальность.

Вот и сам Шкловский в последней своей статье отказывается от идеи уникальности и выдвигает ещё более неутешительную гипотезу «тупиковой ветви». Глядя на приведённую выше формулу, замечаешь, что единственная возможность как-то избавиться от этого гигантского числа — предположить, что время жизни экспоненциальной стадии развития цивилизации много меньше времени жизни Вселенной. Другими словами, Молчание Вселенной можно объяснить, предположив, что технологические сверхцивилизации попросту не возникают. Почему? Возможны два ответа: из-за потери интереса к технологическому развитию или гибели. Шкловский выбирает, и, замечу, не без оснований (ведь пока не видно и конца технологическому развитию), второй вариант. Ведь известно, как пишет Шкловский, что наша Земля является, в сущности, кладбищем видов: по оценкам биологов с начала возникновения жизни на Земле проэволюционировало около одного миллиарда видов, а сейчас их всего два миллиона. Не есть ли и разум некоторой гипертрофированной (как масса тела у динозавров) функцией, ведущей к неизбежной гибели? Но тогда разум — это всего лишь неудачное изобретение природы, тупиковая ветвь.

Посчитаем цивилизации

Давайте посмотрим на цивилизации как на один из астрофизических объектов нашего Млечного Пути.

Впервые это сделал, по-видимому, Дрейк — автор знаменитой формулы Дрейка. Однако его формула оказалась настолько же длинной насколько бесполезной. Все дело губит огромное число до сих пор неизвестных параметров, входящих в неё. Физики XX в., особенно первой его половины, когда не было компьютеров, постоянно стакивались с такими задачами. Вот представьте, что вы физик-теоретик попали в «Шарашку» и пытаетесь рассчитать поражающее действие противотанкового снаряда. Т. е. решить задачу: пробьёт ли проектируемый снаряд броню немецкого «Тигра» или нет? При этом у вас кибернетика — лженаука, и под рукой только арифмометр «Железный Феликс». А над вами стоит генерал, а иногда и генералиссимус (например, в атомном проекте). Решить задачу точно — нет никакой возможности. Поведение стали при давлении, создаваемом снарядом, является крайне сложным физическим явлением. Однако известно из натурных экспериментов, что сталь при попадании в неё пушечного снаряда становится похожей на жидкость. Ага, тогда теоретик аппроксимирует реальную зависимость давления от плотности стальной жидкости — уравнение состояния стали — простой степенной зависимостью часто как $\boldsymbol{P} \sim \boldsymbol{\rho}^3$. В коротком интервале плотностей эта формула вполне приемлема и существенно упрощает решение. Дальше решение получается достаточно простым, а точнее сказать решение становится возможным. Короче, физики имели большой набор таких фокусов и всегда старались все неизвестные параметры спрятать в один, желательно безразмерный коэффициент. Советской астрофизике повезло — вначале 60-х гг. в неё пришли большие учёные из оборонки.

Так, трижды герой Социалистического труда — академик Зельдович, специалист по взрывам, в прошлом руководитель лаборатории под нехитрым названием «Теория атомной бомбы» — научил своих аспирантов упрощать «нерешабельные» задачи. Например, теория дисковой аккреции топталась более 20 лет на месте, пока аспирант Зельдовича Николай Иванович Шакура не спрятал всё, что мы не знаем о турбулентности в один безразмерный параметр «альфа», о котором известно только одно — он меньше единицы. Так появилась самая цитируемая работа астрофизики XX в. «Теория дисковой аккреции на чёрные дыры», которую часто называют альфа-моделью.

Итак, вернёмся к внеземным цивилизациям. Помните про очередь в музеи и про то, как считают звёзды? Предположим, что среднее время жизни t цивилизаций много меньше возраста Вселенной: $t << T \sim 1/H_0$. Последние несколько миллиардов лет глобальные процессы стабилизировались, и наша Галактика на временах t особо не изменяется. Тогда число цивилизаций, одновременно существующих в Галактике, равно:

$$N_{\text{Цивилизаций}} = p\nu^* t.$$

Здесь ν^* — старая добрая функция Солпитера — скорость образования звёзд в нашей Галактике. Чтобы особо не вдаваться в детали, достаточно помнить, что в нашей галактике каждый год рождается одна звезда типа Солнца $\nu^* = 1$ **штука/год.** Ну, если брать звёзды поменьше Солнца, которые уже не желтые карлики, а красные — то будет раз в 6 побольше. Но красные карлики ужасно пыхают рентгеновскими вспышками, и жить в их планетных системах не

особо приятно. Поэтому оставим только звёзды типа Солнца. Да и это честнее — ведь мы пока наблюдаем цивилизации только рядом с Солнцем. Ну а всё наше незнание того, как образуется жизнь, переросшая в технологическую цивилизацию, мы запрятали в параметр p — доля звёзд, порождающих технологические цивилизации типа наших.

«Ну и что?» — скажет въедливый читатель, — скорость звёздообразования известна, а остальное то нет!» Погодите, мы должны использовать ещё один экспериментальный факт — космических чудес нет и уж точно нет контактов с внеземными цивилизациями.

Давайте напишем условие отсутствия контактов, используя нашу формулу. Очевидно, что контактов нет если расстояние между цивилизациями больше, чем путь, дважды пройденный светом за время жизни цивилизации $D > 2ct$. Чтобы найти среднее расстояние между цивилизациями найдём средний объём галактики, приходящийся на одну цивилизацию и извлечём из него кубический корень. Звёзды образуются в тонком газопылевом диске толщиной h в несколько сотен световых лет и радиусом примерно R = 30 тыс. световых лет. Полный объём этого своеобразного инкубатора равен: $V = \pi R^2 h \approx 3 \cdot 10^9$ кубических световых лет. Среднее расстояние в световых годах между цивилизациями оказывается равно:

$$D = D^* p^{-1/4} = 1000\ p^{-1/4}\ \text{световых лет.}$$

Соответственно, чтобы не было контакта нужно, чтобы время жизни цивилизации было меньше чем $t < t^* p^{-1/4} = 1000\ p^{-1/4}$ **лет**.

Величины D^* и t^* это структурные константы нашей галактики, определяемые размерами и скоростью звездообразования[113]. Как видим, искомый ответ крайне слабо зависит от единственного неизвестного параметра $\boldsymbol{p}$. До последнего времени оптимисты поиска внеземных цивилизаций полагали, что доля звёзд, порождающих жизнь, мала уже потому, что мало планетных систем. Так, ещё на заре начала поиска внеземных сигналов в 60-е гг. бытовало убеждение, что Солнце особенная, редкая звезда и отличается от других жёлтых карликов, например, предельно медленным вращением вокруг оси. Мол, планеты отбирают момент вращения у родительской звезды, а так как большинство звёзд главной последовательность вращаются быстро — то и нет планетных систем, как правило. «Солнце — это звезда из ряда вон, и планет кот наплакал», — заявляли решатели парадокса Ферми.

И вот открытия тысяч планетных систем космическим телескопом «Кеплер» показало, что практически каждая звезда массой $\boldsymbol{M \sim M_{\odot}}$ окружена планетной системой. Значит, наша Галактика кишит планетными системами и планетами! Значит, единственная возможность сделать коэффициент $\boldsymbol{p}$ очень маленьким — это уповать на то, что жизнь даже в очень примитивном виде рождается редко, а уж разумная — тем более. Даже если технологическая цивилизация образуется у одной из десяти тысяч звёзд — всё равно время жизни ограничено исторически осязаемыми

[113] Эти структурные константы были впервые выведены в статье вашего непокорного слуги (В. М. Липунов, Астрон. Ж., 1988, т. 65, с. 433) и независимо найдены Александром Тутуковым.

временными рамками. Всё дело в том, что структурное время t^* близко по величине к возрасту нашей цивилизации. Конечно, скажет вдумчивый читатель, ну а почему же нельзя сделать p сколь угодно малым и тем самым увеличить время жизни цивилизации. Нельзя! Потому что парадокс Ферми и наша безумная экспонента! «Ну, чёрт с ней, с экспонентой» — твердят мои оппоненты то тут, то там. Да в том и дело, что мы говорим о гибели технологической стадии цивилизации, которую мы наблюдаем несколько веков подряд. Но ситуация гораздо хуже, чем мы думаем. Все дело в том, что число $N3$ не просто велико, а безумно велико. Настолько, что многие профессионалы даже не могут это почувствовать. Но совсем недавно я нашёл доходчивую иллюстрацию величия этой экспоненты.

Через сколько лет мы научимся порождать искусственные Вселенные?

Еще в первой главе мы рассказывали о том, как физики ввели в теоретический обиход особые большие числа, составленные из фундаментальных констант. В физику вошли большие числа Дирака, но в этом ряду немного затерялись члены великой Джаз-банды — Гамов, Ландау и Иваненко. Но на самом деле большие числа Дирака и магический куб Джаз-банды сыграли огромную направляющую роль в развитии физической мысли XX в. Это очень интересное занятие — брать разные фундаментальные константы и составлять из них некие характерные величины. Как то ещё в аспирантуре Зельдовича, играясь в этом направлении, я вдруг обнаружил удивительную вещь — в магическом кубе Джаз-банды невоз-

можны процессы с мощностью больше некоторой. Смотрите. Давайте возьмём некое физическое тело и попытаемся выпотрошить из него всю энергию за минимальное время. Полная энергия тела массой M равна $E_{max} = Mc^2$, а минимальное время $t_{min} = R_{min}/c$ где R_{min} — его минимальный размер. Но минимальный размер тела, очевидно, равен его гравитационному радиусу $R_g = 2GM/c^2$ — иначе из него уже энергию не выудишь. Отсюда получается, что максимальная мощность, или как говорят астрономы, светимость, равна:

$$L_{max} = E_{max}/t_{min} = c^5/G.$$

Эту размерную константу в 1916 г. обнаружил Альберт Эйнштейн, когда теоретически показал существование гравитационных волн в общей теории относительности. Кстати, он её назвал естественной светимостью. Эта самая естественная светимость входит в эффект, открытый Стивеном Хокингом — испарение чёрных дыр. Сам эффект является результатом применения квантовой механики к самому нелинейному объекту ОТО — чёрной дыре. Если из релятивистской квантовой механики взять идею Дирака о море виртуальных частиц, а из чёрной дыры присутствие приливных сил и наличие критической поверхности, то окажется возможен новый процесс. Смотрите — в море Дирака купаются виртуальные частицы. Поскольку вакуум должен быть нейтрален, то на самом деле это виртуальные парочки частицы-античастицы. В обычном вакууме парочка не разбегается на расстояние больше длины волны де Бройля, которая вблизи горизонта событий, где скорости релятивистские, становится комптоновской

длиной волны $\lambda_{\text{компт}} = h/mc$. Парочка остаётся виртуальной. Однако вблизи чёрной дыры частица, которая ближе к горизонту притягивается сильнее своей визави. Это и есть приливная сила, действие которой многие ощущают на берегу океанов. Она всегда пропорциональна размеру разрываемого тела и обратно пропорциональна кубу расстояния R до него:

$$F_{\text{приливная}} = GMm/R^2 - GM/(R+l)^2 \approx$$
$$\approx GMmL/R^3 \text{ если } L << R.$$

Приливная сила вблизи горизонта чёрной дыры достаточна для того, чтобы вырывать из дираковского вакуума виртуальные частицы. При этом одна частица ныряет под горизонт, а вторая становится реальной и улетает в космос. Процесс рождения частиц из вакуума должен подчиняться закону сохранения энергии. А именно, работа приливной силы должна быть больше энергий покоя двух частиц пары:

$$A = F\,\lambda_{\text{компт}} > 2mc^2.$$

Так как размер горизонта пропорционален массе чёрной дыры, то видно, что приливная сила $F_{\text{приливная}} \sim 1/M^2$. У маленьких чёрных дыр приливная сила больше и процесс рождения частиц идёт вблизи них быстрее. Чёрная дыра начинает светиться, и мощность её свечения возрастает с уменьшением массы. Меня заинтересовал вопрос — а что будет, если в результате испарения чёрной дыры её масса станет меньше планковского предела? Я взял и разделил планковскую энергию на планковскую массу и обнаружил, что постоянная Планка самым счастливым образом выпала из ответа:

$$E_p = m_p c^2 = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}}\,; \quad t_{\mathrm{P}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$$

$$\boldsymbol{L_{pl} = E_{pl} / t_{pl} = c^5 / G \approx 2{,}4 \cdot 10^{52}\ \text{Вт.}}$$

Это может означать, что чёрные дыры массой меньше планковской не испаряются, — тут же подумал я. Ведь максимальная светимость в ОТО и в будущей квантовой гравитации должны быть одинаковы! Конечно, светимость — это не инвариантная величина, она зависит от системы отсчёта. Да и вопрос об испарении чёрных дыр меньше планковской должен решаться будущими неизвестными пока уравнениями квантовой гравитации. Но для астрофизиков, живущих в расширяющейся Вселенной, все объекты убегают и кажутся менее яркими. Можно утверждать, что естественная светимость является максимальным пределом светимости объектов в нашей Вселенной. Таким образом, естественная светимость является мерилом яркости в нашем мире[114].

Именно с этой светимостью или лучше сказать мощностью рождалась наша Вселенная в инфляционном сценарии. Ведь раздувание началось в эпоху очень близкую к планковской. Давайте подсчитаем, через сколько времени земляне разовьют свою мощность до максимальной, двигаясь по экспоненте?

Мощность современной цивилизации примерно оценивается как $\boldsymbol{L_0 = 10^{16}\ \text{Вт.}}$ Составим уравнение,

---

[114] Кстати, можно рассчитать соответствующую предельную абсолютную звёздную величину объекта Вселенной:

$\boldsymbol{M_{\min} = -2{,}5 \lg (L_{\max} / L_{\odot}) + 4{,}7 \approx -73}$.

которое позволит нашей цивилизации достичь максимального предела: $L_0 e^{t/\tau} = c^5/G$. Отсюда находим время, через которое наша цивилизация сможет рождать Вселенные:

$$t_{max} = 100 \ln(L_{max}/L_0) \text{ лет} \approx 6000 \text{ лет}.$$

(«*Ну, просто какое-то библейское число*[115]» — восклицает *Уффф*.) А чудес нет! Учитывая, что космическим чудом может быть и гораздо менее мощный процесс, мы приходим к неизбежному выводу, что цивилизации должны погибать гораздо раньше и, следовательно, время жизни их значительно меньше $t << t_{max}$. Вот вам и причина, почему время t не может превышать структурное время t^*. Т. е., нам осталось всего несколько столетий, и наша цивилизация должна погибнуть!

Какова конкретная причина гибели? Атомная война, экологическая катастрофа? Вряд ли. Ясно, что при всём возможном многообразии «местных» условий и специфик, гибель разных цивилизаций должна происходить по одной универсальной причине. По какой? Интересная возможность обсуждается в «Кулповском меморандуме»[116]. Универсальная причина гибели Разума во Вселенной может быть связана с потерей его основной функции — **функции познания.**

---

[115] Станислав Лем в «Сумме технологий» ссылается на цифру, полученную фон Хорнером для средней жизни цивилизаций — она удивительным образом равна 6000 лет!

[116] Вл. Хлумов, «Земля и Вселенная», 1987, No 1, с.95.

Простая Вселенная

Мир устроен просто,
ведь его создал Господь
Бог. Какой смысл изобретать
сложное, если можно сделать простое?
Вл. Хлумов «Мастер дымных колец»

Что есть разум или разумная жизнь? В чём цель её появления среди неживой и живой природы? Нет смысла вдаваться в подробное обсуждение этих вопросов. Достаточно ограничиться следующим простым тезисом: разумная жизнь характеризуется стремлением понять и объяснить происходящие вокруг явления. Важно, что возникающие при этом интерес и любопытство весьма неустойчивы. Интерес к понятому явлению пропадает практически мгновенно. Открыв какой-либо закон природы, мы начинаем искать новые явления, не подчиняющиеся ему. Никакие самые «интересные практические приложения» старых законов не могут заменить поиска новых. Всевозможные частные случаи, новые режимы, оригинальные подходы, как бы они ни были заманчивы, — всё это бледная тень настоящего процесса познания. Разум чахнет без принципиально новых, необъясненных явлений. Погибнуть можно от атомной или биологической бомбы. Но все это — детские игрушки по сравнению с тем, что могла бы придумать цивилизация, опережающая нас лет на двести. Уже сейчас, в рамках открытых законов природы, можно представить столь мощное оружие, последствия применения которого носили бы галактические масштабы. Такая братоубийственная война вполне сошла бы за космическое чудо. А чудес нет!

Силы, препятствующие развитию разума, должны иметь совсем иную природу. И они, конечно же, должны носить универсальный, не зависящий от конкретных условий, характер.

Прежде чем переходить к описанию возможной причины, приводящей к гибели разума (естественной гибели разума), подумаем над следующей проблемой: почему человеку за кратчайшие (по космологическим масштабам) сроки удалось понять законы природы, которым подчиняется вся наблюдаемая часть Вселенной? Каких-то двух-трёх тысяч лет оказалось достаточно, чтобы дойти до квантовой механики и общей теории относительности. Каким образом человек, чей повседневный опыт ограничивается банальными масштабами, измеряемыми метрами, скоростями, в десятки миллионов раз меньшими скорости света, и ничтожно слабым полем тяготения, не выходя из дома, проник в гигантские просторы Вселенной и вглубь бесконечно малых элементарных частиц?

Античные философы описывали процесс познания так. Представим себе бесконечную плоскость. Кружочек на плоскости — это часть познанного нами. В процессе познания круг увеличивается, поглощая предыдущее знание, но растёт и граница с непознанным. Познание рождает все новые и новые вопросы. Процесс бесконечен.

Точка зрения эта стара, как мир. Но не слишком ли примитивно такое обобщение нашего мимолетного опыта? Неужели бесконечно сложный объект так прост? Скорее нет, чем да. Ведь «сложность» — в первую очередь характеристика качественная, а не количественная. Бесконечно сложный объект должен состоять из бесконечно сложных, качественно раз-

личных частей и не обязательно совместимых. Мир, а точнее, система знаний о мире — это не матрёшка. Познав часть такого непростого объекта, мы не можем быть уверены в том, что наши знания впишутся в последующую систему знаний подобно тому, как маленькая матрёшка входит в большую. Скорее всего, познание должно быть весьма нелинейным процессом. Экстремальным (но вовсе не частным) случаем могла бы быть столь сильная нелинейность, что познание какой-либо части вообще невозможно без знания полной картины. Другими словами, бесконечно сложный объект непознаваем в принципе. **Разум не мог бы возникнуть в бесконечно сложной Вселенной!**

Высказанный выше негативный тезис о несоответствии последовательно познаваемых частей, находится в вопиющем противоречии со всем нашим опытом. Весь наш опыт кричит о том, что наш мир — матрёшка (рис. 57).



Например, механика Ньютона стала частью специальной теории относительности Эйнштейна, которая, в свою очередь, стала частью общей теории относительности. Это то, что называется принципом соответствия Бора.

Как же снять очевидное противоречие? Есть два выхода: либо мы неправильно представляем себе бесконечно сложный объект, либо окружающий мир не бесконечно сложен. Выбрать правильный ответ, можно только опираясь на наблюдаемые факты... А факты — вещь упрямая. Вспомним: разум, лишённый пищи, погибает. Всё становится на свои места. Отсутствие космических чудес свидетельствует о том, что **наша Вселенная слишком проста для разума.** Быстро (за несколько тысяч лет) познав её законы, разумная жизнь исчерпывает все возможности своих применений и исчезает. Парадоксально, но факт: разум возникает и погибает по одной и той же причине — по причине простоты устройства нашего мира.

Миллион лет средневековья или конец Золотого века

Конечно, идея простоты мира — это хоть и внутренне непротиворечивая и вполне соответствующая опыту, но всё же только возможность. Да и почему цивилизация обязательно должна погибнуть?

Мы присутствуем (я имею в виду последние сто лет) в уникальное время — в своеобразный Золотой век. Впервые за всю человеческую историю характерное время экономического развития стало сравнимым с продолжительностью человеческой жизни. Любой человек, вне зависимости от своего образо-

вания и понимания окружающей действительности, почти кожей чувствует прогресс. Родившись во времена паровозов и первых аэропланов, он вырастает, уже глядя в голубые экраны, а пенсию получает, используя компьютерную банковскую сеть. Жизнь человека XX в. проходит на быстро сменяющемся бытовом фоне и рождает в нём совершенно новое мироощущение, и, как следствие, происходит смещение человеческих ценностей. Вечные вопросы отступают на задний план, вперед выходит туристическая тяга к перемене мест и времени. Слава Богу, эта смена декораций — результат всё-таки изобретательности и ума, и поэтому налогоплательщики выделяют средства на удовлетворение своей любознательности. Теперь всякому правительству (конечно, я имею в виду развитые страны) очевидно, что нужно подкармливать фундаментальные исследования: они окупятся, они, в конце концов, экономически выгодны. Но астрофизика показывает, что такое положение не может быть вечным, более того, оно не может продолжаться долее нескольких сотен лет, иначе мы бы давно уже открыли маленькие космические чудеса. Что же последует потом? Мрачное средневековье? Гибель? Тупиковая ветвь? Неужели люди — те же динозавры? Естественно, простой и привлекательный выход из парадокса Ферми — это предположение о быстротечности технологической фазы, но **без** гибели. На ум сразу приходит альтернативный «западному» (так можно назвать экспоненциальную технологическую фазу) варианту вариант «восточный»; уход цивилизации в самосозерцание (развитие вглубь). Но как представить такую будущую жизнь на нашей планете после всего, что на ней уже построе-

но? Я имею в виду не обычное пространство, заполненное сверхскоростными поездами, сверкающими зеркалами небоскребами, опутанное единой компьютерной сетью, и сидящего в нём самосозерцающего рериховского старика, а пространство человеческой активности. Где тысячи любознательных, жаждущих новых парадоксов умов?

Нетривиальный прогресс

Газета открывалась передовицей под названием
«Трудись и не выдумывай».
Он два раза прочёл статью, но ничего не понял.
Речь шла о каком-то нетривиальном прогрессе,
об исторической миссии отдыхающих и
ещё о непринуждённости и непредвзятости.

Вл. Хлумов, «Санаторий»

Ну почему обязательно применять такие невесёлые термины «тупиковая ветвь», «гибель», «средневековье». Можно же представить себе будущее, в котором цивилизация устроена разумно. Человек рачительно использует энергию, добытую воспроизводимыми источниками — ветряные электростанции, экономичный транспорт, безотходное производство, чистый воздух... в общем, не будущее, а самый настоящий санаторий — этакий экологический рай. «Санаторий», так и называлась антиутопия, написанная мной 30 лет назад[117]. По названию воображаемой планеты, на которой реализован этот рай. В основу

[117] В. Хлумов, «Санаторий», Повесть-антиутопия, «Румбы фантастики», 1989 г. Изд-во «Молодая гвардия». Почитать можно здесь: http://www.pereplet.ru/text/sanw.html

развития общества положена идея нетривиального прогресса. Собственно в нетривиальном прогрессе никакого прогресса и нет. Как нет и развития. Но это и не кладбище, где всё тихонько и спокойненько. Нетривиальный прогресс использует идею стационарности, а не статичности. Лучше всего объяснить идею этого будущего рая на примере такого раздела физики, который называется гидродинамика. В гидродинамике различают три типа течений жидкости — статическое, стационарное и нестационарное[118]. Статическое собственно вообще не движение, а просто стояние жидкости, например вода в стакане принимает форму стакана и никуда не двигается, а поверхность её совпадает с линией постоянного потенциала гравитационного поля. Газы тоже сюда подходят. Например, наша атмосфера в первом приближении — статична — она не падает на Землю и не улетает в космос — она находится в гидростатическом равновесии, в котором сила тяжести уравновешена силой давления газа атмосферы. Вернее разности давлений внизу и наверху. Напомню, что само давление не создаёт силу. Силу создаёт разность (или, как говорят гидродинамики — градиент) давления. Нестационарное течение — это течение, которое меняется со временем в каждой его точке. Например, река в половодье становится непредсказуемой особенно где-нибудь в Сибири, где ещё стоит лёд и образуются гигантские заторы. И как результат — наводнения. Но есть ещё один режим — это стационарное течение. Эта летняя подмосковная речка, на ко-

[118] Для простоты мы рассматриваем только ламинарные, то есть безвихревые, течения.

торой нет шлюзов. Рыбак, стоящий на берегу, видит перед собой одну и ту же картину течения — ширина, уровень и скорость течения не меняются со временем. А вот у лодочника, который свободно сносится вдоль течения, — картина всё время меняется. Там где река становится уже, течение набирает скорость, и, наоборот, в широких местах замедляется и почти, кажется, стоит. При этом постоянным остаётся так называемый общий поток воды — вода нигде не накапливается и не убывает. Рыбак в лодке — это наш типичный член экологического рая. А само течение реки — от верховья до низа — это и есть нетривиальный прогресс. Каждый член общества ощущает прогресс по жизни — каждый новый день его жизни — это новый пейзаж, который проносится куда-то в прошлое — меняются поселки, небольшие города и деревни — каждый день что-то новое — но на самом деле с рекой ничего не происходит: она не становится более полноводной и она не мелеет. Вот и получается и река цела, и рыбаку весело. А жизнь реки, как развивающегося во времени объекта, стоит на месте. («*Недаром поётся в песне: речка движется и не движется*» — *Уфф*).

Нетривиальный прогресс не приводит к росту валового продукта — никакой экспоненты нет. Есть постоянная величина энергетического баланса цивилизации — валовой продукт стоит на месте. При этом каждый член общества от рождения до смерти проходит все стадии личного прогресса. В его, как сказали бы физики, лагранжевой системе отсчёта, жизнь на этой удивительно-зелёной планете удалась. Нет недовольных, нет протестующих — а жители Санатория естественно называются отдыхающими.

Элементарные траектории отдыхающих от рождения, свадьбы, старения и смерти складываются в один неменяющийся поток жизни на планете Санаторий.
Но стоит немного подумать, и вдруг начинаешь понимать, что не всё так гладко в этом экологическом диспансере. Спрашивается, а что же делать с правом наследия? Ведь если человек рождается с капиталом, то его траектория уже начинается из новой точки, с более высокой ступеньки. Очевидно, никакого права наследия и нет на этой планете. Есть жёсткая система контроля над рождаемостью — важно чтобы население не менялось — и никакой частной собственности. Дети, едва родившись, будут отделены от родителей, чтобы их мировые линии в точности повторили линии отцов, дедов и пращуров... Это все решаемо. Все получают среднее образование. Миллион лет школьники пишут одно и то же сочинение на тему «Герой нашего времени». Точно как в древнем Шумере: ведь писали же школьники тысячу лет сочинения на тему «Гильгамеш — герой нашего времени»[119]. Но вот куда же подевались эти странные непоседливые, с горящими от любознательности глазами людишки. Где эти выдумщики — Эдисоны, Кулибины, Эйнштейны и Ломоносовы? Ведь в математическом уравнении этого прогресса все источники прогресса должны быть обнулены?! Землянин, который попадает на эту планету, не понимает, что же тут происходит с учёными, инженерами, программистами? А оказывается, нетривиальный прогресс

[119] Собственно именно поэтому удалось восстановить полностью текст древней поэмы «Сказание о Гильгамеше» — по тысячам дошедшим до нас осколкам глиняных табличек — сочинений школьников.

требует нетривиальных жёстких мер ограничения источников прогресса. Можно селекционным генетическим путём уничтожить функцию познания и изобретательства! Функцию творчества! Конечно, бывают и ошибки, и недочёты, и тогда опасные индивидуумы изолируются в специальных местах. Там, лишённые компьютеров, бумаги и финансирования они становятся неопасными узниками особых подземных тюрем. А знаете, как они строили эти тюрьмы? Они их не строили — они просто использовали коллайдеры и синхрофазотроны, опустевшие после конца эпохи технологического экспоненциального развития.

Вы думаете, это фантастическая выдумка? В 90-гг. в отдельно взятой стране состоялась попытка построить нетривиальный прогресс. Учёные, инженеры, изобретатели стали настоящими изгоями общества. Тысячи энтеэровцев[120] вышли на рынок с турецкими шмотками. Институты закрывались, а те, что не закрывались, фактически убивались уровнем финансирования — кандидат наук вначале 90-х получал 10–20 долларов в месяц. В довершение ко всему были остановлены великолепные научные проекты советской эпохи. Да, тюрьмы и лагеря создать ещё не успели. Близ города Протвино под землей скрыто чуть больше двух десятков километров тоннеля, множество служебных выработок, камер для оборудования и шахт. Огромная кольцевая разветвленная подземная система сооружалась для нужд науки... Строительство было остановлено в связи с прекращением финансирования. Это — недостроенный адронный коллайдер в подмосковном городе физиков Протвино. Огромный

[120] Сокращённое от «научно-технический работник».

кольцевой туннель почти закончен, кажется, вот-вот зазвучат весёлые голоса младших научных сотрудников, весело устанавливающих сцинтилляторные камеры для разгадки глубин мироздания. Но нет, тишина. Ещё не слышен дребезжащий вой сирены на вечернюю перекличку, ещё не пошёл надзиратель с криком «Не спать! Не спать! Не спа...».

(«*Ну, ты и нагнал «позитиву» — Уффф*) А что вы хотели, братцы? Вы думаете, после Золотого Века наступит глобальный профилакторий и всех вас направят на курорты? Ведь это число 10 в степени 43 000 000 — это же потенциальная мощь интеллекта. Это его неисчерпаемый мотор истории, это сила, напряжение, воля (как сказал бы Заратустра словами Ницше) прогресса сверхцивилизации. Что бы остановить эту волю к прогрессу, необходима такая же по силе, но обратная мощь невежества, ретроградства, духовного и физического тоталитаризма. Попробуйте поддержать нетривиальный прогресс хоть тысячу лет, и вам смерть цивилизации от столкновения с километровой каменной глыбой покажется розовой мечтой о рае небытия.

Игра, вся жизнь — игра...

В 1970 г. закончил аспирантуру Викторий Шварцман — один из самых талантливых учеников Якова Зельдовича, очень рано ушедших из жизни. За три года обучения в аспирантуре он написал несколько теоретических работ — все они остались актуальными по настоящее время. Достаточно перечислить главные результаты, полученные аспирантом.

Он впервые предсказал существование рентгеновских пульсаров — намагниченных нейтронных звёзд, источником энергии которых является процесс аккреции захваченной звездой плазмы. Шварцману, опираясь на химические свойства Вселенной, удалось предсказать существование разных типов нейтрино, которое великолепно подтвердилось через 30 лет. И наконец — главная его работа под названием «Ореолы вокруг чёрных дыр» — выводы в которой к сожалению пока не подтвердились — была посвящена тому, как проявляют себя чёрные дыры в нашей Галактике. Именно в этой работе он показал себя как удивительный тип учёного-естествоиспытателя. Этот тип практически исчез к началу XX в. Ве́ка раздробленности науки, ве́ка узких профессионалов и узких специалистов, подобных флюсу. Терапевтов, как говорится — практически не осталось.

Ведь как поступает сейчас теоретик? Как Эйнштейн. Построил теорию, пусть, мол, другие проверяют. Но учёных, которые не могли успокоиться, решив довольно сложную задачку, почти не осталось. Им нужно обязательно на собственной шкуре прочувствовать полученный результат. Таким был Больцман, таким был Дальтон. И вот Шварцман не останавливается на публикации статей, а бросает Москву — команду Зельдовича — и едет открывать чёрные дыры в ущелье... на Северном Кавказе. Да, там стоял самый крупный в то время в мире шестиметровый телескоп. Но ведь там нет ни интернета, ни семинаров Зельдовича, нет той самой атмосферы Джаз-банды, в которой и рождаются великие открытия. В общем, для теоретика — выбор был нетривиальный. Это уже был поступок учёного-естествоиспы-

тателя, натурального философа. К сожалению, ему не удалось открыть чёрные дыры своим методом. Жизнь его, после 10 лет поисков, закончилась трагически. А вот теперь вы должны прочувствовать его мысли по поводу Великого Молчания.

Интереснейший выход из парадокса Ферми был предложен именно Шварцманом — замечательным советским астрофизиком. Главное, новое зерно его идеи[121] состоит в том, чтобы не выводить проблему Великого Молчания Вселенной из области науки, а наоборот — попытаться изменить само понятие науки. Приведу целиком абзац из его статьи 1986 г. «Наука есть лишь часть, элемент культуры, причём элемент сравнительно молодой. Эвристические принципы, идея верификации и ценностные установки современной науки «выкристаллизовались» внутри культуры лишь около 400 лет назад. Лишь в XVIII в. началось экспоненциальное возрастание параметров науки, т. е. её развитие приобрело необратимый характер. Лишь в XX в. наука превратилась в производительную силу общества, а её результаты во многом определили облик человечества и даже поставили под вопрос его будущее. Общепризнано, что преобразование характера науки в XX в. является глобальным и беспрецедентным; вероятно оно будет продолжаться и впредь (например, под влиянием других форм духовной деятельности человека или распространения супер-ЭВМ, или контакта с Внеземной Цивилизацией ...). Поэтому не исключено, что смысл категории “наука” изменится к XXX столетию столь же радикально,

---

[121] В. Ф. Шварцман, «Проблема поиска жизни во Вселенной», М., Наука, 1986, с. 230

как и за предыдущие десять веков». Перенося эти рассуждения на любую другую цивилизацию, Шварцман полагает, что мы давно уже «принимаем сигналы», но не осознаем их искусственную природу. Другими словами, Великое Молчание, парадокс Ферми — это не просто кризис отдельной физической теории, а кризис самого научного метода в современном его понимании. Кстати, на то же указывает и надвигающийся кризис современной физики, впервые столкнувшейся с невоспроизводимыми экспериментальными данными.

В последние десятилетия, появилась идея, что мы как раз и живём в настоящей игровой приставке. По интернету ходит замечательный фильм, который популяризирует идею о том, что все мы с вами живём в компьютерной игре. Это своеобразный вариант, положенный в основу фильма «Матрица». Только он более уютный — поскольку нет ни заговоров, ни революций, но зато становятся понятными главные чудеса квантовой механики — неравенства Гейзенберга, запутанные состояния и квантовая телепортация.. Как бы там ни было, а фильм является прекрасной лекцией по квантовой механике.

Парадокс Циолковского

Мы не будем дальше обсуждать другие возможности, например, связанные с изобретением искусственного разума и саморазмножающихся машин (об этом обычно говорят западные футурологи[122]). Ничего принципиально нового в обсуждаемую проблему они

[122] F. J. Tipler, Q. J. R. Astron.Soc., 1981, v. 22, 279.

не вносят, так как сталкиваются с тем же самым парадоксом Ферми. Ведь искусственный интеллект буде созданный человеком, окажется неким существом, сработанным по образу и подобию человека. Наоборот, я хочу показать, что в действительности **парадокс Ферми** — это всего лишь бледная тень той настоящей проблемы, перед которой стоит нынешнее естествознание. И, в сущности, стоит уже несколько столетий. Вернёмся к нашей формуле, определяющей число ***N3***. Что в ней от современной науки? Во-первых, экспонента. Во-вторых, наблюдаемый темп развития нашей цивилизации, и, в-третьих, возраст Вселенной. Представьте теперь на минуту, что мы пытаемся написать эту формулу в XIX в.? Что изменится? Экспоненциальное развитие уже наблюдается. Уже известно характерное время ***t*** развития цивилизации. Оно тогда было побольше, чем в конце XX в., но для конкретного расчёта мы его и так взяли из прошлого века. А вот с возрастом Вселенной всё было совершенно не так. В прошлом веке я был бы обязан подставить в экспоненту $T = \infty$. Ведь ещё расширение Вселенной не открыто, и Вселенная вечна! И нам совершенно неважно, как быстро развивается цивилизация: тысячу лет, миллион или миллиард. Как говорится, перед вечностью — всё тлен. В ответе мы получим не аномально большое, а бесконечное число. Вот это уже не просто парадокс, а настоящий тупик. Поражает, каким образом лучшие умы прошлого века прошли мимо такого вопиющего факта? Ведь природа, имеющая возможность бесконечно долго рождать жизнь, рано или поздно должна была произвести на свет Сверхразум. Да что там прошлый век, если уже в нашем столетии сначала Эйнштейн, а потом Хойл

пытались научно обосновать бесконечно живущую Вселенную. Не ведали, что творили?

Я долго пытался найти хотя бы одного физика или философа, который, пусть и вскользь, но обсудил столь взывающий к пониманию факт. Действительно, такой человек нашёлся, правда, не в XIX в., а в нашем веке, но поскольку он и не подозревал о расширении Вселенной или не верил (дело в том, что первоначальные оценки возраста Вселенной были сильно занижены и противоречили геологическим данным), то, фактически рассуждал как человек прошлого века. Им оказался Константин Эдуардович Циолковский, гениальный технарь, мечтатель и, несомненно, философ. К сожалению, наиболее последовательно свои мысли он изложил только устно, в разговоре с Чижевским, который позже записал их беседу. Но результат его размышлений — неоднократно публиковался[123]. Да, он понимал, стоя на чисто материалистической точке зрения, что бесконечное развитие природы рано или поздно должно было закончиться полной экспансией разума. Отсюда идея разумного атома и «совершенных существ» и, наконец, идея Разумной Вселенной, которая может восприниматься современным естествоиспытателем как угодно иронически, но сама-то причина появления на свет этих мыслей совершенно естественна для научного метода. Если Вселенная жила бесконечно долго, то парадокс Циолковского

[123] К. Э. Циолковский, «Монизм Вселенной», в сборнике «Грезы о Земле и Небе», Тула, Приокское Книжное Издательство, 1986 г., с. 276 и с. 419 (А. Л. Чижевский, «Теория Космических Эр»).

может быть решён только в одном ключе — ключе существования Сверхразума.

Вы скажете, слава Богу, пришел астроном Хаббл, открыл расширение Вселенной, и мы поняли, что Вселенная наша была не вечно. Всего-то десять миллиардов лет, а там, глядишь, можно закрыть глаза на десятку с сорока тремя миллионами нулей и отделаться уникальностью, тупиковой ветвью или «восточным» вариантом. Во-первых, как мы видели, сделать это совсем не просто, так сказать, за давностью отживших природою лет, а во-вторых, так ли уж не вечен этот мир?

Энтропия растёт как сорняк на грядке, а остаётся прекрасной незнакомкой

> *Термодинамика — это единственная физическая теория общего содержания, относительно которой я убеждён, что в рамках применимости её основных понятий она никогда не будет опровергнута.*
>
> Эйнштейн

Вот скажи, дорогой читатель, хотел бы ты, чтобы твоим именем назвали потенциально опасный астероид, который в будущем, возможно даже очень далёком, может упасть на Землю и погубить человечество? Думаю, если твоя фамилия не Герострат, то вряд ли ты захочешь такой славы. А вот представь теперь, что ты большой учёный, даже не просто большой, каких десятки в каждое время, а очень большой. И вот ты вывел некую формулу, или даже лучше сказать закон, согласно которому не просто там какая-нибудь планета погибнет (они, наверное, тысячами

гибнут во Вселенной каждый день), и даже не звезда и не галактика, а прямо-таки вся Вселенная. Ну, каково? Сразу скажу, что учёного этого звали Людвиг Больцман. Ведь именно из его статистической теории термодинамики следовало нерадостное предсказание будущей тепловой смерти Вселенной.

Вот и наступила пора, когда уже невозможно обойтись без энтропии. («*Ну, ты, брат, дотянул*» — *Уффф.*)

Термодинамика загадочна ещё и потому, что работает с понятиями, которые никак не укладываются в голове. Самый яркий пример — энтропия. Эта штука, введённая Клаузиусом как некая величина, связывающая изменение тепла с изменением температуры, совершенно не поддаётся человеческой интуиции. Но точно как без понятия массы, силы и энергии невозможна физическая картина мира, так невозможно описание природы без понятия энтропии. Энтропия напоминает любимую женщину, её никогда не поймёшь до конца, но без неё жить невозможно[124].

Никакой Уфф не поможет на пальцах вам объяснить, что это за штукенция такая. Известно, что она в изолированной системе растёт всегда. Но ведь это просто определение сорняка какого-то.

Нет, это не ботаника и не агрономия, это и есть — Второе начало термодинамики. Именно этот закон запрещает создание вечных двигателей, проекты которых французская академия перестала принимать с XIX в. Нобелевский лауреат, американский физик

[124] https://pikabu.ru/tag/%D2%E5%F0%EC%EE%E4%E8%ED%E0%EC%E8%EA%E0/hot

Ричард Фейнман, который предложил свою собственную трактовку квантовой механики, написал великолепнейший курс физики в 10-ти томах на очень популярном уровне. Это был своеобразный американский ответ курсу Ландау и Лифшица. Итак, в четвертом томе «Кинетика. Теплота. Звук» он приводит следующее остроумное определение энтропии: энтропия — это количество теплоты, в одноградусной тепловой машине. Если вспомнить формулу для энтропии, которую придумал Клаузиус $\Delta S = \Delta Q / T$, то так и получится. А теперь следите за руками. Пусть некое количества теплоты перешло от более горячего тела к другому, более холодному. Тогда изменение энтропии будет равно:

$$\Delta S = -\Delta Q / T_1 + \Delta Q / T_2.$$

Так как $T_1 > T_2$, то $\Delta S > 0$. Значит утверждение того, что энтропия всегда растёт эквивалентно утверждению, что тепло может переходить только от горячего тела к холодному. Это и есть второе начало термодинамики. Но что такое энтропия — не понятно.

Именно тогда первое начало термодинамики — закон сохранения энергии можно записать так:

$$\Delta U = \Delta A + \Delta Q = -p \Delta V + T \Delta S.$$

Правда, из этой формулы следует, что если в процессе изменения состояния термодинамической системы тепло не уходит и не приходит, то энтропия её не изменяется! Такие процессы называются равновесными и реализуются при достаточно плавном изменении термодинамических величин. К счастью во Вселенной именно так и происходит, если характерное время выдвижения поршня больше времени

релаксации (времени, за которое система приходит в равновесие). Конкретно процесс идет равновесно, если его время релаксации ме ньше обратной постоянной Хаббла (хаббловское время). При этом энтропия не изменяется и именно поэтому раньше она нам и не была нужна.

Ну, это пока просто формулы. А какой же их физический смысл? Первым попытался разгадать загадку энтропии Людвиг Больцман. Блестящий учёный в молодости написал уравнения, которые описывают ансамбль огромного числа частиц. Эти уравнения (сейчас называются именем Больцмана) поставили его в один ряд с таким гигантом как Максвелл. Будучи заведующим кафедрой физики в Венском университете он пытается интерпретировать термодинамику на основе атомарной природы вещества. Легко выводит уравнения идеального газа. Впервые, кстати, выдвигает идею о том, что атомы и молекулы могут обладать дискретным набором энергетических уровней! Именно эту идею использует Макс Планк в своей работе 1900 г. И наконец, он пытается из атомарных позиций объяснить, что такое энтропия!

Но ведь атом ещё не открыт официально. Официальная наука забыла об опытах Дальтона. Но атомистический подход позволяет любую термодинамическую систему представить как набор микроскопических дискретных состояний. Именно такой она предстаёт в великой формуле Больцмана:

$$S = k \ln W.$$

Здесь k — постоянная больцманана а W — *некая термодинамическая вероятность.* Ее иногда называют статистическим весом. Вероятность термоди-

намической системы занять определённое состояние пропорциональна статистическому весу — т. е. количеству мест в этом состоянии. В этом смысле величина ***W*** пропорциональна вероятности найти систему в этом состоянии. Вот не знаю, ездил ли ты, мой дорогой читатель, в общих вагонах? Посуди сам, едет поезд, а в нём вагоны разные — общие, плацкартные, купейные и ещё «спальные» (на два пассажира). Понятно, что лучше ехать в спальных. Белье застелено — на столе печеньки к чаю. Соседей почти нет. Но билеты там самые дорогие — дешевле самолётом лететь. В купейных уже 4 человека могут находиться. В купейных подешевле, но тоже не для студента. В Плацкартных — 6, если учесть «боковушки». Ну а в общих — словно шпротов в банке — только они не лежат, а в основном сидят. Конечно, всё портит цена билетов. Положим по какой-то причине все билеты вдруг стали стоить одинаково. Вопрос: где больше вероятность найти пассажиров, если они загружались при полной панике — например в гражданскую войну («*Не дай Бог*!» — *Уффф*). Очевидно, в том вагоне, где больше мест. Вот это и есть термодинамическая вероятность. Смотрите, уровень комфорта обратно пропорционален энтропии. Тут можно и включить цену на билеты — это своеобразный барьер, вроде потенциального в атоме. При термодинамическом равновесии количество пассажиров в вагонах как раз будет подчиняться формуле Больцмана. Равновесие будет достигнуто в том момент, когда энтропия станет максимальной. А чем больше энтропия, тем больше бардак, как в общем вагоне. Соответственно природа тянется именно к бардаку. Энтропия, как ввёл её Клаузиус, величина аддитивная — т. е. если подце-

пить к нашему составу ещё вагонов, то энтропия сложится, например, так: $S = S_1 + S_2$. А вот вероятности всегда перемножаются: $W = W_1 \cdot W_2$. Но это возможно только в одном случае — если энтропия логарифмически зависит от вероятности:

$$S \sim \ln W \Rightarrow S_1 + S_2 \sim \ln W_1 W_2,$$

и мы получаем формулу Больцмана для энтропии

$$S \sim \ln W.$$



Рис. 58 Людвиг Больцман (1844–1906)

Формулу Больцмана можно вывести по-другому — в рамках теории идеального газа. Рассмотрим два газа объёмом V_1 и V_2. Очевидно, отношение вероятностей найти частицу в объёме V_1 к вероятности найти её в объёме V_2, равно $W_1/W_2 = V_1/V_2$. Рассмотрим изотермический процесс в идеальном газе: $pV = RT$. Изменение количества теплоты при этом согласно первому началу термодинамики будет равно $\Delta Q = T\Delta S = p\Delta V$. Отсюда $\Delta S \sim \Delta V/V$. Поскольку вероятность пропорциональна объёму, то $S \sim \ln W$. Что и следовало ожидать.

Но если Больцман прав, заявляли его оппоненты, и энтропия, которая, наконец, нашла своё объяснение как мера хаоса, и при этом всегда растёт, то наш мир, в конце концов, достигнет состояния равновесия, соответствующего максимуму энтропии — и наконец, эволюция Вселенной закончится. Ведь равновесие — это когда в мире ничего уже не ме-

няется, ничто никуда не движется, и Вселенная погружается в хаос. Значит, в конце нашу Вселенную ждёт тепловая смерть! Время остановилось?! Так Больцман, абсолютно того не желая, оказался пророком гибели мира. Общий вагон — вот будущее нашего мира!

А что такое время?

Все поступки необратимы.
В пандан братьям Стругацким.

Понятно, что в этой книге мы не будем говорить о биологическом, психическом, беллетристическом (романном) понятии времени. Мы продолжаем говорить о физическом времени.

Да мы вроде уже о нём и говорили — помните мнимую координату вдоль которой несутся все, даже покоящиеся, наблюдатели в теории относительности? Более того, время физическое, как подчёркивает Эйнштейн, это на самом деле некая последовательность операций (почти механических телодвижений), в результате которых собственно и может быть измерено время *t*. Например, течение времени до́лжно измерять с помощью часов. Ну, скажет читатель, так и в ньютоновской механике оно тоже измерялось с помощью часов. Да, но Эйнштейн поправил Ньютона. В часах Эйнштейна всегда применяется световой зайчик — бегающий между параллельными зеркалами. («*Как говорится, белка — в колесе, а зайчик — на ракете — между зеркалами*» — Уфф.) Почему важен именно световой зайчик. Да потому, что главный постулат теории относительности предполагает

постоянство его скорости независимо от системы отсчёта. Свет нельзя догнать! Зайчик позволяет перевести задачу измерения времени в задачу измерения отрезков, которые можно делить на скорость света. Если расстояние между зеркалами будет равно половине световой секунды, то один цикл зайчика будет равен одной секунде. Но это только на космическом корабле. А вот для покоящегося наблюдателя эта секунда растягивается в часы. На рисунке 59 показаны часы Эйнштейна. Зайчик бегает между двумя зеркалами *A* и *B* на Земле и в движущейся ракете. Для неподвижного наблюдателя зайчик в ракете бегает по сторонам равнобедренного треугольника, в углах которого попадаются те же зеркала но в разные моменты времени *1*, *2*, *3*. Неподвижному наблюдателю, очевидно, что ракетный зайчик тратит больше времени на одно колебание и ему кажется, что часы на ракете замедляются.

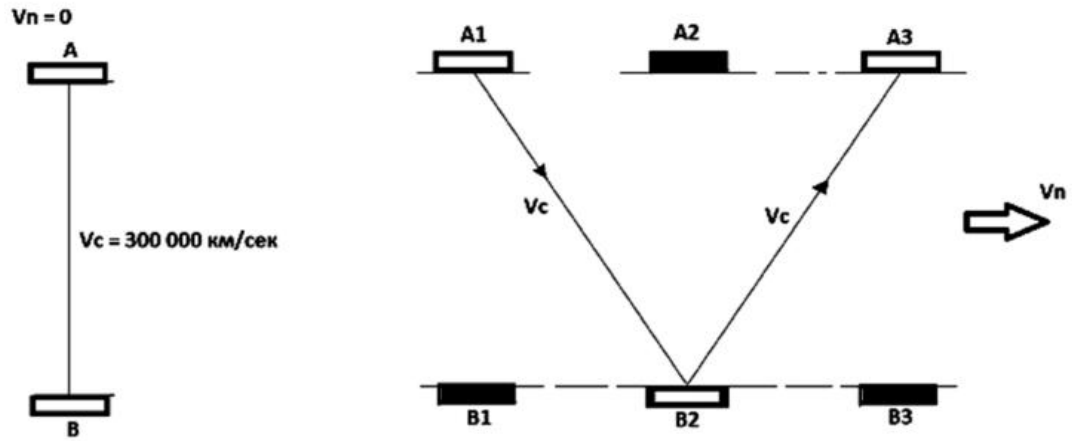


Рис. 59

В ньютоновской механике скорость света складывалась со скоростью наблюдателя, и время везде тек-

ло одинаково. А в жизни — не так. Близнец, улетевший к далёким звездам, возвращается почти таким же молоденьким, а его брат уже состарился... И всё просто потому, что зайчику приходилось бегать по косой («*Тонко замечено*!» — *Уффф*)! Время течёт медленнее! Эффекты теории относительности чудесны и проверены с огромной точностью. Но всё-таки, физическое время в теории относительности в одном совершенно не похоже на реальное время. И в этом смысле оно не лучше ньютоновского. Реальное время необратимо. А ньютоновское и эйнштейновское — обратимо. «Но как же! — возмутится начитанный читатель — ведь теория относительности не допускает путешествия в прошлое». Да, нет. Вполне допускает. А вот не дают ей этого сделать правила приличия. А правила приличия диктует царица всех наук — термодинамика. Нобелевский лауреат, замечательный физик и химик Илья Романович Пригожин всегда подчёркивал — физического времени, как времени, в котором всё можно вернуть — нет[125]. Действительно, в классической механике, как и в теории относительности, игра в бильярд обратима. Зная закон Ньютона и начальные условия, вы, перед тем как разбить пирамиду, можете высчитать точное направление движения всех шаров. Более того, можно пустить физическое время обратно (поменять знак времени в уравнениях), и шары соберутся снова в пирамиду. Так вот именно это и невозможно в термодинамике. Потому что нет и в жизни обратимых процессов!

---

[125] Пригожин И., Стенгерс И. «Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой». — М.: Прогресс, 1986. — 432 с.

Людвиг Больцман потратил немало времени (извините за тавтологию) на объяснение главного свойства времени — необратимости. Его программа казалась очень понятной и логичной. Дело в том, что Больцман был ярым сторонником молекулярной теории строения вещества. Движение каждой молекулы подчиняется законам Ньютона и, следовательно, движение молекул обратимо, как и движение бильярдных шаров.

Посмотрим ещё раз на второй закон Ньютона: сила F равна произведению массы m тела на его ускорение a — учили нас в школе. Напишем его наоборот — тогда это будет уже называться уравнением движения:

$$a = F/m,$$

шар приобретает ускорение прямо пропорциональное силе и обратно пропорциональное — массе и начинает двигаться по инерции. Ускорение есть изменение скорости в единицу времени, а скорость это изменение пройденного пути в единицу времени. Зная ускорение — вы можете предсказать скорость, а зная скорость в каждой точке — найдёте траекторию. Начальное расположение шаров и начальные скорости — это и есть начальные условия для уравнения движения. Если у вас есть начальное расположение и начальная скорость, можно предсказать будущее. Именно об этом говорил великий Лаплас, в духе Архимеда: «Дайте мне начальные условия, и я рассчитаю весь мир». Иногда цитируют как «предскажу будущее». И он был бы прав, если бы весь мир подчинялся механике Ньютона. Смотрите, если поменять в уравнении движения знак силы и ускорения на обратный, то уравнение не изменится:

$$-a = -F/m.$$

Это значит — ньютоновское время можно повернуть вспять, и тела вернутся к начальным условиям! Такое впечатление, будто ньютоновский мир обладает идеальной памятью траекторий, и по ним он может вернуться обратно. Ньютоновское время обратимо! А реальное время — нет! Но, скажет продвинутый школьник, ньютоновская механика неправильная, работает эйнштейновская. Но эйнштейновская так же обратима, как и ньютоновская. Хорошо, будет настаивать победитель всероссийской олимпиады по физике — вот в квантовой механике такой хаос, что время никогда обратишь вспять. Ведь там не то, что нет начальных условий, там и координат то строго определённых нет, и ускорений тоже нет! Но на это в своё время ответил Илья Пригожин. Дело в том, что формально уравнения Шрёдингера так же обратимы при смене знака времени, как уравнения Ньютона или Эйнштейна! Просто речь уже идёт не о координатах и импульсе в пространстве, а о вероятности обнаружить частицу с данными координатами и импульсами. Время есть только в одной науке — в термодинамике. Второе начало термодинамики как раз и говорит о том, что обратимых процессов — нет.

Но вот парадокс, который не давал покоя Больцману: газы, состоящие из молекул — тех же бильярдных шаров — не могут участвовать в обратимых процессах. Где же, происходит сбой? Такое впечатление, что с увеличением числа молекул в какой-то момент они перестают быть молекулами и забывают свою начальную траекторию! Во всяком случае, Больцман пытался объяснить необратимость стати-

стикой огромного числа частиц. Но у него ничего из этого не вышло. Тепловая смерть Вселенной явилась непомерным грузом для учёного. К нему добавилась личная семейная трагедия, и Больцман добровольно ушёл из жизни.

Но ждёт ли Вселенную тепловая смерть, которая следует из второго начала термодинамики? Не всё так просто. Дело в том, что в классической термодинамике предполагалось, что макросистема состоит из микрочастей, независимых друг от друга. Да, вагоны прицеплены и летят в одном направлении, но не просто перейти из общего вагона в спальный. Такое представление о веществе вполне объяснимо. Дело в том, что молекулярные силы резко падают при удалении частиц друг от друга — они короткодействующие. Но позвольте, возразит вдумчивый читатель, молекулами правит сила Кулона — притяжение и отталкивание между электрически заряженными частицами[126]. Вот именно «...и отталкивание». Закон Кулона для притяжения двух зарядов — будто точная копия закона всемирного тяготения. Но с одной лишь разницей: в природе есть электрические заряды разных знаков. Причём разноименные притягиваются. Сравним электрическое взаимодействие электрона и протона с гравитационным: $\boldsymbol{F_g / F_e \approx 10^{-42}}$! Гигантская кулоновская сила не даёт разбежаться зарядам разных знаков — поэтому почти все тела вокруг нас электронейтральны. Происходит экрани-

[126] Дотошный читатель с химическим уклоном может спросить: «Причем тут Кулон, если молекулы электронейтральны?» Да, общий заряд молекул равен нулю. Но молекулы не точки и, пролетая мимо друг друга они поляризуются — положительные заряды подтягиваются к отрицательным, и возникает сила притяжения!

ровка молекул, и на больших расстояниях они уже не чувствуют друг друга. Но если взять, например, газ, состоящий из звёзд, то силу притяжения нечем скомпенсировать — все массы обычных объектов положительны! Поэтому систему, в которой правит гравитация — а наша Вселенная именно такой объект — нельзя разбить на микроэлементы, которые ничего не знают друг от друге. Поэтому выводы о тепловой смерти делать преждевременно.

Великое Молчание Будущего

Почему к нам никто не приходит из будущего?
— Потому что его у нас нет.
Придумано в минуту печали.

Машину времени придумал не Герберт Уэллс. О ней человечество мечтало давным-давно в лице разного рода прохвостов и проходимцев. Как было бы здорово некоторым антигероям Конан Дойля или О. Генри прибыть из настоящего в прошлое и со знанием дела кое-что поправить в своей судьбе. Однако путешествия в прошлое запрещает принцип причинности, который намертво связан с термодинамикой и законом сохранения энергии. Представьте, себе — вы отправились в далёкое прошлое, нашли там своего пра-пра-дедушку-подростка («*Пра-пра*» — *это что б не так жалко было?*» — *Уффф*), поссорились с ним, потолкались и случайно столкнули под поезд.

Парижская академия наук перестала рассматривать проекты вечных двигателей уже лет двести, как противоречащие здравому научному смыслу.

(«*Правда, так же она поступила и с теорией падающих из космоса камней, пока на её дворе не упал метеорит*» — *Уффф*). Однако, то и дело появляются в довольно серьёзных журналах, статьи описывающие всякие чудеса чудесные — такие как квантовая телепортация или машина времени. Или, например, была замечательная статья о том, как узнать с помощью света, есть ли мина в тёмной комнате, если она взрывается от одного фотона, и при этом остаться живым. Всё это можно сделать реально! Но только с элементарными частицами!

Здесь нам нужно вернуться к основам квантовой механики. Дело в том, что одним из важнейших, основополагающих принципов квантовой механики является принцип абсолютной идентичности всех элементарных частиц данного сорта. («*Что же ты такую вещь скрыл? — Уффф*)[127] Хм, возмутятся школьник и академик, разве в теории идеального газа Больцмана частицы разные? Все одинаковой массы, все одинакового размера и движутся по одним и тем же законам. Что ж тут нового? А в том то и дело, что у Больцмана, и вообще в классической физике, любую частицу газа нельзя спутать с другой! Каждая из них лежит на некоей траектории с некоторым номером! И никогда не сходит со своей мировой линии. Другими словами, в классической физике частицы, например, электронного газа, можно пронумеровать и следить за судьбой каждой в отдельности!

---

[127] Если бы я просто его огласил, читатель тут же забыл бы его. Другое дело теперь с машиной времени и с телепортацией — он навсегда запомнит почём фунт лиха в квантовой механике.

В квантовой механике это абсолютно невозможно! В своё время крупный физик Ричард Фейнман, популярные лекции которого по физике никем не превзойдены, в своем жанре, пытаясь понять одинаковость элементарных частиц, дошёл до того... Так следите за руками, читатель... Фейнман предположил, что «разные» электроны потому идентичны, что их множества вовсе нет, а есть один огромный длинный электрон-червяк, который живёт сразу во всех параллельных («*Что это?*» — *Уффф*) мирах, а мы каждый раз, регистрируя электрон, видим лишь его проекцию на нашу скорбную реальность. Сильно?! («*Да уж*» — *Уффф*). А зачем ему это надо было? Вспомним про эксперимент-задачу о том, как электроны через две щели и на экран попадают. С этого эксперимента начинается том лекций по квантовой механике. Фейнман, спрашивает читателя: «А есть классическое объяснение того, что за щелями возникает интерференционная картина?» Видно, сам долго искал такое, не нашёл, но зато придумал новое понимание квантовой механики.

Вот возьмём нашего велосипедиста Петю, который уже мчит на последнем отрезке мимо стен Великого Новгорода в Петербург. В обычной квантовой механике Шрёдингера—Гейзенберга, вам сказали бы, что Петя одновременно и волна, и частица, и траектория его движения известна только с некоторой вероятностью. А Фейнман предложил считать, что Петя на самом деле двигается по одной из классических траекторий — как материальная точка у Ньютона или молекула газа у Больцмана. Но! Одновременно, из пункта *А* (**М)** в пункт *Б* (**СПб)** двигаются множество точно таких же Петь-велосипедистов, каждый

по своей классической трассе! («*Да где же столько дорог в России найти, тут одну-то днём с огнём приличную не найдёшь, а зато уж Петь этих правда — навалом*!» — *Уфф*) Ну, это же мысленный эксперимент! Ведь двигаются они в разных параллельных мирах. И кроме трассы М11 (она же Е105 по международной классификации) да ещё той, что идёт через Пушкинские горы и Псков (Петя обычно напевает песню про Е95)[128]. Каждая из траекторий этих имеет свою вероятность, так что если сложить все траектории (в параллельных мирах), то сумма будет равна точно единице — и Петя попадёт в Петербург. («*Петя у тебя, словно пробный камень Галилея, а и то верно, ведь Петя — это Пётр, а Пётр означает камень на латыни*» — *Уфф*.) Конечно, самой вероятной является дорожка М11 Москва—Петербург, но а остальные маршруты резко уступают, причём тем резче, чем больше масса пробного тела.

Так вот, все эти квантовые чудеса происходят именно с элементарными частицами. Представим себе, на минуту, что Петя — это элементарная частица и вовсе никуда не поехал, а просто взял и телепортировался из Москвы в Петербург. Допустим, у Пети в Питере живёт брат-близнец, зовут его Паша. Но если его назвать Петей, то никто — ни мать родная, ни милиция, ни сокурсники не поймут, что теперь в Питере живёт не Паша, а Петя. А как это устроить? Ведь сейчас весь мир погружён в сеть Интернета. Например, можно хакнуть базу данных

[128] Вскоре полностью откроется новая супертрасса Москва — Петербург и это будет ещё одним вкладом в фейнмановскую трактовку квантовой механики.

Санкт-Петербургского университета, потом ГУВД и т. д. и там подправить списки. То же самое сделать с Пашей, и отправить его вместо Пети, и окажется, что Петя никуда не уезжал ни в какой Питер, а, будучи Пашей с добрым покладистым характером, на следующий день помирился с Машей. Обратите внимание, чтобы поменять нам Петю и Пашу местами надо было соблюсти два важных условия. Во-первых, нужны были абсолютные близнецы. А во-вторых — нужен был Интернет, а возможно даже заранее написать скрипт и запустить его одновременно в московских и питерских базах данных, и тогда Паша и Петя телепортировались бы со скоростью больше скорости света. Вот это была бы путаница! Настоящая комедия положений.

Теперь бегом в физическую лабораторию. Впервые экспериментально квантовая телепортация поляризационного состояния фотона была осуществлена в 1997 г.[129] почти одновременно группами физиков под руководством Антона Цайлингера (Университет Инсбрука) и Франческо де Мартини (Университет Рима). Нужно взять две элементарные частицы, которые родились одновременно (словно близнецы — мама-**X** у них-то одна). Например, это могут быть два фотона, выпущенных велосипедистом Петей для вывода формулы $\boldsymbol{E = Mc^2}$. Только теперь Петя стоит на

[129] Экспериментальная реализация квантовой телепортации поляризационного состояния фотона была осуществлена в 1997 г. почти одновременно группами физиков под руководством Антона Цайлингера (*Nature* volume 390, pages 575–579 (11 December 1997)) и Франческо де Мартини (Phys. Rev. Lett. 80, 1121).

месте, а фотоны рождены были в результате распада некоторой не вращающейся частицы **X**:

$$X \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2.$$

Пусть частица **X** — не поляризована. Очевидно, плоскости поляризации двух фотонов должны быть направлены таким образом, чтобы суммарная поляризация фотонов была равна нулю. Такие фотоны, и подобные им элементарные частицы, называются запутанными как близнецы. Обратите внимание — эти фотоны не могут друг с другом общаться. Однако если пропустить один из них через поляризатор и изменить его поляризацию на противоположную — то фотон, удалённый на многие мегапарсеки, тут же обязан поменять свою поляризацию. Но поскольку квантовые частицы тождественны, то можно сказать, что фотон *1* встал на место фотона *2*, т. е. мгновенно телепортировался в галактику Андромеды.

На самом деле никакой реальной телепортации — передачи информации со скоростью, больше скорости света, не происходит. Да и Петя — не элементарная частица! И родная мать никогда не спутает Петю и Пашу. Вот, например, если бы наш велосипедист Петя был квантовой частицей, то и имени у него не было бы. И был бы он, как в задачнике, безымянным велосипедистом или пешеходом, путешествующим из пункта *А* в пункт *Б*. А мы его взяли к себе в книгу как объект классический — с тонкой душевной организацией, с непокорным характером и жаждой знаний. Попробуйте такого телепортировать со своими бездушными волновыми уравнениями!

Но с другой стороны, наука идёт вперед, в будущее, и когда-нибудь там, в этом прекрасном далёко,

какой-нибудь Шурик, а может быть и сам Петя изобретёт машину времени! Но вот проблема, ни квантовым образом, ни классическим, никто из будущего к нам не приходит! Конечно, может быть мы должны сначала дожить до того момента, когда машину времени («*МВ не путать с ВМ*» — *Ууфф*) изобретут, и с того момента, когда её изобретут, появятся петлеобразные мировые линии из прошлого (которое пока ещё в будущем) и обратно! И в этом случае исчезнет парадокс с «убитым прапрадедушкой».

Но, вот что меня настораживает, отчего это другие цивилизации, которые на миллиарды лет нас опережают, так и не создали до сих пор простецкой машины времени. Ведь оттуда — из будущего — и правда никто не приходит[130].

Во всяком случаем Великое Молчание это не только про Вселенную прошлого, но и про Вселенную Будущего!

Невозможность обратить время вспять скорее всего связана с постоянной потерей информации. Тем более, что согласно теоремы Котельникова и Шеннона о том, что при передаче двоичной информации (например, из прошлого в будущее) всегда происходит потеря данных. Конкретная причина состоит в конечности ширины информационного канала. Ширина канала — это понятно каждому школьнику, сидящему

---

[130] Как отмечает И. Д. Новиков, квантовая машина времени может работать только после того как она будет создана и «ездить» она будет не дальше в прошлое, чем момент создания. То есть эти петли во времени появляются, только после создания МВ. Однако, это не объясняет Великого Молчания Будущего в свете возможного существования других, значительно более старых цивилизаций.

часами в Интернете, и знающему как «лагает» видео. Но как связана ширина канала с созданием машины времени? Да ведь что бы вернуться в прошлое, нужно знать абсолютно точную карту маршрута: как вы из прошлого попали в будущее. А если карты точной нет, то и машины времени — нет! Покойный ныне И.М. Гуревич[131] написал не одну книгу на эту тему.

В начале Игорь Михайлович пришёл к нам в институт, как приходят сумасшедшие на семинар ОСА[132] — с общей Теорией Всего. Но довольно быстро я понял, что Гуревич — не сумасшедший, хотя идеи которые он высказывал, были вполне сумасшедшими. Я перечислю парочку. Например, вся физика — это теория информации. Почему нет? Ведь физические уравнения пишутся для, так называемых, наблюдаемых величин, которые определяются (читай — информация о которых получена) в ходе физического (хотя бы и мысленного) эксперимента.

Сразу становится понятной квантовая механика. Поскольку канал информации всегда имеет конечную ширину — то, следовательно, информация о координатах и импульсе элементарных частиц всегда обладает некой ошибкой. Вот вам и соотношение неопределённости. Вот вам и бит информации и постоянная Планка.

Или: рост энтропии можно объяснить потерей информации. Причём эта, со времен работ Нобелевского лауреата Ильи Пригожина, известная

---

[131] Статьи и ссылки И. М. Гуревича можно найти на его авторской странице в «Русском переплёте» http://www.pereplet.ru/avtori/gurevich.html

[132] Общемосковский семинар астрофизиков http://master.sai.msu.ru/ru/osa/.

формулировка, получает в работах Гуревича количественное подтверждение. Или, как-то он посчитал полную информацию Вселенной, но тут уж надо быть математиком и специалистом не по космологии, а по теории информации. Вообще, если сумма энтропии ***S*** и информации ***I*** остаётся постоянной, то энтропия, наконец, становится понятной физической величиной:

$$I + S = \text{const}.$$

Правда, буквально в эти дни появился ещё один квантово-механический парадокс. Группа физиков под руководством ведущего сотрудника Лаборатории квантовой теории информации МФТИ и Института теоретической физики имени Л. Д. Ландау РАН Гордея Лесовика показала, что второе начало термодинамики нарушается для квантовых систем с запутанными состояниями. Значит ли это, что подвергнуто сомнению второе начало. Да нет же, конечно. Ведь и связанные частицы в квантовой механике и гравитирующие системы в астрофизике — это объекты с дальнодействием, и они не могут считаться изолированными.

Было ли время, когда не было времени?[133]

Текущий момент в Космологии определяется идеями высказанными в начале 80-х гг. прошлого века, когда появилась на свет идея инфляции[134], и открытием ускоренного расширения Вселенной. ещё до появ-

[133] «*Ну и название, а когда оно — это время — есть?*» — *Уфф.*

[134] A. H. Guth, Phys. Rev., 1981, v. 23, p. 347.

ления работы Гуса было ясно, что стандартная «фридмановская» модель Вселенной сталкивается с четырьмя необъяснёнными или неестественными фактами. Это те самые четыре парадокса — четыре ложки дёгтя, похоронившие старую модель Вселенной. Первый парадокс: существование объектов во Вселенной на фоне практически идеально-изотропного реликтового излучения. Решение Лифшица спасла темная материя и без нее нас бы никогда не появилось во Вселенной. Второй парадокс решен в результате экспоненциального инфляционного ее рождения в самом начале разбухания. Вселенная получила время чтобы стать причинно-связанной.Стало ясно, почему причинно несвязанные в начальное время части наблюдаемой Вселенной так похожи друг на друга (изотропия реликтового излучения и однородность в больших масштабах). Третье: почему средняя плотность Вселенной при всём мыслимом многообразии так близка к критической? Другими словами, почему она разлетается подобно ракете двигающейся со второй космической скоростью? Здесь уже само решение Лифшица спасло инфляцию. Фактически, по отдельности, эти вопросы были решены в ряде работ Глинера и Дымниковой[135], Гуревича, Старобинского, но Гус первым предельно чётко связал их воедино с существованием **пятой силы или скалярным полем.** Как раз к этому моменту выяснилось, что в природе, наряду с гравитационным, электрическим, ядерным и слабым взаимодействиями, должен

[135] Глинер Э. Б., Дымникова И. Г., *Письма в Астрон. журн.* 1 (5) 7 (1975); Gliner E. B., Dymnikova I. G. *Sov. Astron. Lett.* 1 93 (1975).

быть ещё один тип взаимодействия, описываемый скалярным потенциалом. В сущности, скалярное поле в определенных условиях обладает свойствами антигравитации и именно на ранних этапах, через несколько планковских времён после появления Вселенной, оно обладает отрицательным давлением и «разгоняет» расширение Вселенной (инфляционная фаза расширения Вселенной). Потом, вследствие фазового перехода, появляются обычные поля и частицы, а расширение замедляется, и Вселенная становится фридмановской. При этом начальный размер Вселенной оказывается столь малым и почти не растущим, что разные её части успевают обменяться информацией, а энергия скалярного поля в точности обеспечивает критическую плотность Вселенной.

Четвертый парадокс — парадокс молодой Вселенной, решен благодаря открытию ускоренного ее расширения, которое скорее всего связано с тёмной энергией космического вакуума.

Рождение Вселенной сейчас рассматривается как некоторый случайный, квантово-механический процесс «пузырения» физического вакуума, сопровождающийся очень сильным раздуванием. В действительности, в модели стохастического рождения, развитой А. Д. Линде, наша Вселенная — часть некоторого квазистационарного процесса непрерывного рождения и раздувания Вселенных. Другими словами, старая мечта человечества о других Вселенных сейчас рассматривается вполне научно, хотя и полукачественно, в рамках или, точнее, на границе с пока ещё не созданной теорией квантовой гравитации. Однажды путешествуя по склонам вулкана острова Тенерифе, я нашел иллюстрацию к этой модели. На фотогра-

фии (рис. 46) показана картина возникновения возможной жизни в стохастической Мультивселенной. Внимательный читатель легко обнаружит существование жизни, а возможно и разума, в некоторых Вселенных. *(См. вклейку 25)*

Для нас важно два принципиальных момента: 1) наша Вселенная не одинока и 2) существует некое «допланковское время жизни» у каждой такой Вселенной, на котором, вообще говоря, само классическое понятие времени теряет свой смысл (в силу, например, чисто квантовой неопределённости причинно-следственных связей). Давайте подсчитаем гравитационный радиус чёрной дыры планковской массы:

$$R_g = 2GM_{pl}/c^2 \approx h/mc.$$

Но h/mc — это комптоновская длина волны. Если вспомнить неравенство Гейзенберга

$$\Delta x \Delta p \approx R_g M_{pl} c \approx h,$$

то радиус чёрной дыры $R_g \approx h/M_{pl}c$ оказывается порядка планковской длины. Что же это за чёрная дыра, если она не знает — под горизонтом событий она или снаружи!?

Короче говоря, несмотря на спасительное открытие Э. Хаббла, вопрос о безграничности во времени нашей Вселенной опять всплыл, как и в XIX в., и опять замаячил стационарный вариант Хойла. Конечно, на самом деле теперь уже речь идёт совершенно о другом понятии времени, но для нас важно, что у природы было и есть бесконечное число возможностей для создания Вселенных типа нашей и, следовательно, для возникновения жизни, и опять нужно как-то разрешать парадокс Циолковского.

Кто загнал Вселенную в угол?

Как было показано выше, при экспоненциальном развитии с характерным временем **τ = 100 лет**, технологическая цивилизация достигает максимальной мощности, равной c^5/G, всего за библейские сроки: несколько тысяч лет. Напомним, что именно с такой мощностью, согласно современному инфляционному сценарию, рождалась наша Вселенная. Следовательно, цивилизация через несколько тысяч лет развития будет способна создавать Вселенные в лабораториях, а возможно и на фабриках!

Давайте окунём полотенце в холодную воду, обмотаем голову и подумаем. Непреложным наблюдательным фактом является то, что наша Вселенная появилась из сверхплотного состояния. Говоря языком магического куба, Вселенная появляется из того угла, где гравитационная постоянная G и постоянная Планка h велики, а скорость света c мала. Возникает вопрос, а кто загнал её в этот угол? Представим себе некий разум, который желает размножаться вечно. На определенной стадии развития он смекает, что раз Вселенные рождаются из сверхплотного состояния, то что бы сделать новую Вселенную нужно создать сгусток сверхплотной энергии с планковской плотностью. Вообще-то этот процесс постоянно идёт в нашей Вселенной самым естественным образом. По данным научной разведки в нашей Галактике — Млечном Пути — каждый век в результате звёздной эволюции появляется примерно одна чёрная дыра. Каждая чёрная дыра — чёрная (да и то не совсем!) в основном для окружающей её Вселенной. А внутри, под горизонтом событий творятся страшные

вещи. Там возможно образование сингулярностей, или по крайней мере таких областей пространства-времени, в которых воспроизводятся условия того самого угла магического куба, из которого вылетела наша Вселенная 13,7 млрд лет назад. Следовательно, там, в планковских недрах чёрной дыры, загнанная в угол материя начинает рождать новую Вселенную! Правда, появится она, как утверждают теоретики с холодной головой, уже совсем в другом месте, и мы об этом ничего не узнаем! Ведь сингулярность окружена горизонтом событий. Тем не менее процесс идёт не только в нашей Галактике. Он идёт во всех миллиардах галактик, доступных нашему взору. Получается, что каждую секунду в нашей Вселенной рождается одна чёрная дыра! Вот это производительность! В этом безумном процессе Вселенная рождает новые Вселенные каждую секунду! Но нет пределов возможностей и жадности сверхразума. («*Уж больно широк ваш Сверхразум. Не пора ли его, как говорит герой Фёдора Михайловича, обузить*!?» — *Уффф.*) Смотрите, чтобы из нормальной, хотя и достаточно массивной звезды появилась чёрная дыра, должно пройти несколько десятков миллионов лет ядерной эволюции. Кроме того, хотелось бы рождать эти вселенные где-нибудь у нас, под присмотром. Конечно в лаборатории… в начале, а потом и на фабрике! Здесь за всем можно проследить — и чтобы постоянная Хаббла была приличная, и чтобы барионов было в достатке, и чтобы тёмной материи было поболее, и тёмной энергии, чтобы не особо молодилась — иначе так и останется изотропной и однородной. Ну и наконец, чтобы парадокс Ферми присутствовал. Только теперь его

можно было бы сформулировать так: если бы где-то в искусственной Вселенной были цивилизации, то у каждого налогоплательщика в доме была бы кротовая нора, или ещё современнее — искусственная Вселенная в банке.

А существует ли теория Всего?[136]

После отделения от философии, натурфилософия, как естественная наука, достигла ошеломляющих успехов. За 300–400 лет физика, химия и биология смогли не только проникнуть в глубочайшие вопросы мироздания, но и прокормить человечество. Оказалось, мир, окружающий человека, устроен таким чудным образом, что в основании всякой современной теории лежит нескольких основополагающих уравнений, из которых огромная научная масса выводит множество полезных практических приложений. В сущности, например, физические уравнения — некоторые высказывания, т. е. некая логически связанная последовательность слов. Поразительно, что наш Мир устроен именно таким примитивнейшим образом. Было бы вероятнее, если бы устройство мира не поддавалось никакому упрощённому языку. Однако мы имеем дело как раз с невероятным миром. Это обстоятельство в своё время подметил А. Эйнштейн в письме к М. Соловину.

Перед этим поразительным, чудесным успехом логической программы, продемонстрированным

[136] Эта глава написана по следам большой статьи автора «Как нам избавиться от Достоевского...», опубликованной в журнале «Русский переплёт» (http://www.pereplet.ru/text/polifon.html).

естествознанием, совершенным провалом выглядит её приложение в науках о человеческом сознании. За две с половиной тысячи лет (срок, впрочем, сам по себе не такой уж и долгий) от Аристотеля до Сартра западная философия прямиком прошагала в тошнотворно-мертвенный тупик, в котором нет никакой возможности занять определённую точку зрения. С одинаковым правом вы можете считать, что весь мир, включая человека, — результат игры воображения. Или наоборот, мир — объективная реальность, фотографируемая, осязаемая, кусаемая и т. д., и т. п.

А, собственно, мог ли быть иной результат? Могла ли наука или научный метод объяснить человека?

Вот, что по этому поводу более ста лет назад писал человек, который ввёл в обиход понятие неэвклидовости и, по выражению А. Эйнштейна, оказал самое на него сильное влияние:

«Мы вполне поверили, да и теперь ещё верим, что положительная наука вполне способна определить нравственные границы между личностями единиц и наций (как будто наука, если б и могла это она сделать, может открыть эти тайны раньше завершения опыта, то есть раньше завершения всех судеб человека на земле)» (Ф. М. Достоевский «Мы в Европе лишь Стрюцкие»).

Как пишет Бердяев, Достоевский был не просто гениальным писателем, но и очень умным человеком (что, конечно, не одно и то же). Сколько в этой фразе смысла — от космологической проблемы граничных условий Коши до Библейских откровений.

Действительно, например уравнения Эйнштейна, устроены таким образом, что, решая любую космо-

логическую задачу, вы не можете получить решение, пока не будут поставлены граничные условия на всех границах, в том числе и временных! Ведь решается задача о пространственно-временном континууме. А что такое поставить граничные условия в конце времени, если не знание всего что произойдёт в искомом решении.

Один из величайших философов XX в. М. М. Бахтин пишет:

«Теоретический мир получен в принципиальном отвлечении от факта моего единственного бытия и нравственного смысла этого факта, как если бы меня не было, и это понятие бытия, для которого безразличен центральный для меня факт моей единственной действительной приобщённости к бытию (и я есмь) и принципиально не может ничего прибавить и убавить в нём, в своём смысле и значении оставаясь равным себе и тождественным, есть я или меня нет, не может определить мою жизнь как ответственное поступление, не может дать никаких критериев для жизни практики, жизни поступка, не в нём я живу, если бы оно было единственным, меня бы не было».

Чего, спрашивается, здесь Бахтин наводит тень на плетень? Вот как выглядит мысль, проводимая Бахтиным на западном языке. Представьте себе, что вы работаете в рамках формальной логики и пытаетесь вывести закон человека. В логической методе вы обязаны сформулировать некую формулу человека, чем, собственно, с изначальных античных времен занималась европейская философия. Итак, у вас есть такая формула (она может быть и длиной в несколько томов, а может быть в одной красивой фразе типа —

«человек звучит гордо»), например, такое высказывание:

$$Z = X + iY.$$

Следите внимательно, речь идёт не просто о формуле. Это может быть большой труд «Капитал», или «Этика» или «Приключения Кандида». А может быть и $E = mc^2$. Положим, вы её открыли, и она объясняет всего человека. Она настолько хороша и объективна, что её подхватили массы, и она живёт сама по себе, т. е. как бы без автора. Например, как закон всемирного тяготения: камни падали всегда вниз и до человека, и до конкретно меня, и дальше будут падать вниз. Закон всемирного тяготения не зависит ни от «меня», ни от «него», ни от «Ньютона». Следовательно, меня-то там любимого не содержится! Вот, положим, помру я, и что же — Луна с орбиты соскочит, или закон сохранения энергии нарушится!? Вряд ли. Следовательно, нет меня в той формуле. Следовательно, нельзя теорию человека от личности отрывать. Причём не просто там от человека вообще, а именно от конкретного меня.

«*Ну ты и хватил, наш непокорный слуга!*» — Ууфф пыхтел как раскочегарившийся паровоз, — мы же о физике, о натуральной философии, а причём же тут человек? Как причём, мы же о теории ВСЕГО! А теория Всего обязана включать и автора этой теории.

Наука и Религия

*«Вы находите удивительным, что я говорю
о познаваемости мира (в той мере, в какой
мы имеем право говорить о таковой)
как о чуде или о вечной загадке»*

А. Эйнштейн,
Из письма М. Соловину
от 30 марта 1952 г.

*«Она (вера — прим. авт.)
Божиему творению не может
быть противна, нижéей Божие творение,
разве тем чинится противность,
кои в творения божия не вникают».*

М. В. Ломоносов

Вернёмся к статье Шкловского[137], к её финалу, весьма и весьма показательному для характеристики нашего времени и обсуждаемой проблемы. «Альтернативой набросанной выше отнюдь не “оптимистической” концепции, — пишет Шкловский, — выступает идея, что разум есть проявление некоего внематериального трансцендентного начала. Это — старая идея бога и божественной природы человеческого разума. Далеким (и не всегда далеким) от науки индивидуумам эта концепция представляется куда более оптимистической и даже нравственной. Трудно, однако, в наше время стоять на позиции, ничего общего с наукой не имеющей. Забвение того основополагающего факта, что мы — часть объективно существующего познаваемого материального мира,

[137] И. С. Шкловский, «Земля и Вселенная», 1985, No 3, с. 76.

никому ничего хорошего не сулит, даже если и создает лжеоптимистические иллюзии».

Прочитав это сейчас, хочется просто помолчать и подумать… Сколько здесь всего и о наших последних десятилетиях, и о самом авторе, и о самой проблеме. И стоять теперь на этой позиции нетрудно, и, более того, сейчас, наоборот — без Бога в душе — неприлично. Но все же поразительная интуиция Шкловского проявилась в финале. Ведь ясно, что концепция «тупиковой ветви» может выжить лишь в маленькой, с конечным возрастом Вселенной, да и то с огромным трудом, а на фоне парадокса Циолковского что же думать? Ведь мы последовательно проводили материалистическую, атеистическую, научную точку зрения, а открыли сверхразум — научно обоснованного бога.

Здесь уместно доцитировать отрывок из письма А. Эйнштейна к Морису Соловину от 30 марта 1952 г., вынесенный в эпиграф: «Ну что же, априори, следует ожидать хаотического мира, который невозможно познать с помощью мышления. Можно (или должно) было бы лишь ожидать, что этот мир лишь в той мере подчинён закону, в какой мы можем упорядочить его своим разумом. Это было бы упорядочение, подобное алфавитному упорядочению слов какого-нибудь языка. Напротив, упорядочение, вносимое, например, ньютоновской теорией гравитации, носит совсем иной характер. Хотя аксиомы этой теории и созданы человеком, успех этого предприятия предполагает существенную упорядоченность объективного мира, ожидать которую априори у нас нет никаких оснований. В этом и состоит “чудо”, и чем дальше развиваются наши знания, тем волшебнее оно становится. Позитивисты и профессиональные атеисты видят

в этом уязвимое место, ибо они чувствуют себя счастливыми от сознания, что им не только удалось с успехом изгнать бога из этого мира, но и "лишить этот мир чудес". *Любопытно, что мы должны довольствоваться признанием "чуда", ибо законных путей, чтобы выйти из положения, у нас нет.* (Курсив мой — *В. М.)* Я должен это особенно подчеркнуть, чтобы Вы не подумали, будто я, ослабев к старости, стал жертвой попов»[138]

Тоже очень характерное высказывание. Здесь, в основном, два пункта. Первое — признание существования настоящего «Космического Чуда», и второе — несомненное понимание того, что из этого немедленно должно последовать признание существования Бога, но сделать это, конечно, нельзя, чтобы не стать «жертвой попов». Но и нельзя одновременно признать бесконечную сложность мира и успешную его познаваемость (т. е. фактически само существование разума в бесконечно сложном мире) и не признать при этом существование *Сверхразума — научно открываемого бога.* Если бы А. Эйнштейн хотя бы подозревал о парадоксе Циолковского, то ничего более естественного ему и не нужно было делать.

Что касается взаимоотношений религии и науки, то никакого особого противоречия между ними и нет. Начнём с вопроса о языке. Возьмём такие слова из научного словаря — пространство, время, масса, притяжение и т. д. Суть этих понятий изменилась за последние триста лет, и в особенности за последние сто, самым катастрофическим образом. Трудно

---

[138] А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, Наука : Москва, 1967, т. 4, с. 567.

даже представить, что эти слова будут означать через следующие сто лет. На каком же языке вести дискуссию? Тем не менее постоянно появляются «дураки» с обоих сторон — одни опровергают библию костями динозавров, а другие теорию Дарвина святым писанием. Эти необразованные и неумные люди были всегда. И всегда были люди мудрые, которые понимали истинную цену этим взаимным нападкам. Вот что пишет Михаил Васильевич Ломоносов в своем труде «Явлении Венеры» более двух веков назад:

«Некоторые спрашивают, ежели-де на планетах есть живущие нам подобные люди, то какой они веры? Проповедано ли им Евангелие? Крещены ли они в веру Христову? Сим даётся ответ вопросный. В южных великих землях, коих берега в нынешние времена почти только примечены мореплавателями, тамошние жители, также и в других неведомых землях обитатели, люди видом, языком и всеми поведениями от нас отменные, какой веры? И кто им проповедал Евангелие? Ежели кто про то знать или их обратить и крестить хочет, тот пусть по евангельскому слову (“не стяжите ни злата, ни сребра, ни меди при поясех ваших, ни пиры на пути, ни двою ризу, ни сапог, ни жезла”) туда пойдёт. И как свою проповедь окончит, то после пусть поедет для того ж и на Венеру. Только бы труд его не был напрасен. Может быть, тамошние люди в Адаме не согрешили, и для того всех из того следствий не надобно. “Многи пути ко спасению. Многи обители суть на небесех”. При всём сём христианская вера стоит непреложна. Она Божиему творению не может быть противна, ниже́ ей Божие творение, разве тем чинится противность, кои в творения божия не вникают».

Об искусственном происхождении Вселенной

Как-то на одном из Объединённых Астрофизических Семинаров (ОАС) после доклада, в котором рассматривалась некая неортодоксальная возможность (по-моему, как раз докладчик рассказывал про модель с космологической постоянной), Зельдович обронил, что, мол, время изменилось и стало всё дозволено. Здесь, конечно, была реминисценция из приписываемого Достоевскому высказывания: «Раз бога нет — значит все дозволено»[139].

Предыдущую главу я написал лет 25 назад, а потом стал размышлять над одним важным вопросом, да так его и не решил и поэтому расскажу вам о нём здесь. Давайте зададимся вопросом о том мире, в котором правит всем квантовая гравитация. Тем более, что то здесь, то там слышны рассуждения по поводу того, что Вселенная родилась из доисторического квантово-гравитационного бульона, когда и никакого времени вообще не было. То есть, если в том первозданном мире не было ни причин, ни следствий, и как следствие («*Браво*!» — *Уффф*) нет места и принципу причинности. Может быть и так! Но возникает нетривиальный

[139] Гимназист Ракитин в романе Братья Карамазовы как бы цитирует Ивана Карамазова: «Нет бессмертия души, так нет и добродетели, значит, всё позволено». Прямо Достоевский нигде не говорит ничего подобного, но весь его великий роман пронизан этой мыслью. А великая мысль невыразима одним слоганом, иначе и роман-то писать незачем. Поэтому Достоевский даже не высказывается прямо словами одного из главных идеологических героев, а лишь цитирует через второстепенного социалиста Ракитина. Последователей Ракитина много, и Поль Сартр, который приписал слоган «Раз нет Бога, то и всё позволено» Достоевскому, и более мелкие писаки типа Виктора Ерофеева…

вопрос, а зачем он появился потом, уже через много планковских времен, и теперь встал он посреди нашей Вселенной в виде запрета Машины Времени и прочих вечных двигателей? Более того, ни один серьёзный академический журнал не примет статью, в которой принцип причинности нарушается в наше время. А всякие второстепенные принципы — например, постоянство скорости света в СТО, или запрет на истинную телепортацию, все они лежат под гнётом термодинамического дамоклова меча: нельзя тепловую энергию полностью превратить в механическую работу!

Очевидно, натуральная философия, не умея сама вывести принцип причинности логически, крадёт его у нашего Мира. А зачем он Миру? На этот вопрос можно ответить и так. В мире без принципа причинности нет нравственности. В мире без необратимости времени всё позволено. В этом мире не может быть Бога, потому что нет понятий поступка, нет понятия свободы воли, и нет понятий Добра и Зла! Как сказал бы термодинамик, в Мире, где нарушено второе начало термодинамики, нет преступлений и нет наказаний. Однако преступления есть, и не значит ли это, что мир наш имеет искусственное происхождение?

Вот это и есть сильный антропный[140] принцип.

Бесконечно сложный мир

Что есть Сверхразум, и что есть будущая наука о бесконечно сложном Мире? Может ли вообще чело-

[140] Напомню: стандартный («слабый») антропный принцип в формулировке советского космолога А. Л. Зельманова: «Мы живём во Вселенной с наблюдаемыми свойствами, потому что все другие Вселенные живут без наблюдателей».

веческий разум создать хотя бы примитивную модель, теорию, концепцию бесконечно сложного, непознаваемого по частям объекта? В рамках современной науки — вряд ли. Ведь она вся изначально построена на атомарной, матрёшечной логике, на признании линейного мира, которая только одна и может предполагать существование независимых, исчисляемых элементов. Сам математический аппарат, с которым имеет дело современная физика, основан изначально на цифровом пастушьем опыте чисел — стадо баранов может быть расчленено на отдельные особи и посчитано. (Приходится только опять удивиться, как при этом мелком багаже науке удалось проникнуть в глубинные тайны Вселенной и атомов?) В нём, в классическом научном методе, изначально заложен прогрессистский подход от простого к сложному. В этом и состоит смысл современной науки — «объяснить». Но в человеческом лексиконе есть ещё два важных слова — **«понять» и «поверить».** Одно из них принадлежит, скорее, искусству, и особенно литературе (она, как и наука, использует язык слов), а другое — религии. Но как совместить это всё вместе, каким образом можно придать, например, формальным математическим высказываниям этическую окраску? И как наша идея научно открываемого бога, к которому неизбежно пришла современная простая наука, соотносится с Богом религиозным?

Один верующий на мой вопрос о том, как Ветхий Завет сочетается с современной оценкой возраста Вселенной в десять миллиардов лет, ответил: «Десять тысяч лет назад в течение одной рабочей недели Господь Бог создал Мир, которому было десять миллиардов лет». Это звучит не только остроумно.

Да, здесь скорее прав В. Ф. Шварцман, полагая, что будущее науки за синтезом всей культуры, но как должен выглядеть этот будущий Метаязык, приходится лишь гадать. По-видимому, двигаться дальше можно, лишь пытаясь отвечать на необычные вопросы. Например, как соотносятся понятия Добра и Зла с принципом причинности? А с присутствием времени или его отсутствием? Возможны ли подтексты в научных высказываниях, двусмысленности, вероятностная интерпретация?

Станислав Лем пишет в своей «Сумме технологий»: «Человечество — это своего рода Робинзон, высаженный на уединённой планете. Решить проблему существования “иных” ему, по всей вероятности, ещё труднее, чем Робинзону. Однако дело того стоит. Если бы мы обнаружили проявления космической деятельности других цивилизаций, то заодно узнали бы и кое-что о своем будущем». Добавим к этому, что отсутствие других цивилизаций, тоже кое о чём говорит.

Одним из важнейших естественнонаучных направлений, конечно, должен быть поиск Внеземного Разума. Скорее всего, открытие внеземных цивилизаций сродни открытию индейцев Колумбом. Гораздо важнее не они сами как биологический вид, а их представление о Боге, о Добре и Зле.

Что делать?
(вместо заключения)

Николай Семенович Кардашёв — замечательный советский и российский астрофизик, академик, один из энтузиастов поиска внеземных цивилизаций, когда слышит не очень оптимистичные вещи о разумной жизни во Вселенной, о судьбе науки и цивилизации в духе тупиковой ветви, часто спрашивает с неким укором и призывом: что ж делать? Где она, положительная программа учёного XXI в.? (См. вклейку 2б).

Конечно мы все — «оптимисты» и «пессимисты» — наследники научно-технологической революционной эпохи. Мы — дети гагаринской эпохи! Мы любим знать! Мы обожаем искать, найти и не сдаваться. Но при этом я считаю, мы должны ставить вопросы так честно, как мы их видим. Если я говорю, что не могу представить тысячу революций в физике и тысячу Эйнштейнов, то действительно не могу этого представить. Это какая-то дурная бесконечность! На самом деле будущее настолько не похоже ни на что прошедшее на отрезке в несколько столетий от Леонардо, Галилея, Ньютона, Лобачевского, Эйнштейна... что его (будущего) приход будет означать катастрофическое (в хорошем смысле этого слова) изменение нашего мышления. Знали ли члены афинской академии, что не пройдёт и несколько столетий как на тысячелетие замрёт человеческая мысль. Это «небольшое»

молчание разума обернулась гибелью тысяч дерзновенных умов и не начавшихся жизней.

Поэтому мы должны продолжать и дальше искать ответы. В конце концов, в этом и состоит отличие разума от своей противоположности.

Многомерная Вселенная!

Инфляция, породившая Большой Взрыв, очень популярна сейчас среди космологов, но она, по-прежнему, остаётся лишь одним из возможных сценариев, хотя и очень заманчивых. С ней соперничают несколько других моделей, среди которых выделяется теория многомерной Вселенной или теория суперструн.

Теория суперструн претендует на полное объединение всех взаимодействий включая гравитацию — Теорию Всего. И ещё одно обстоятельство делает теорию суперструн особенной. Она, в отличие от многих космологических моделей, имеет за спиной не просто некое хитроумное математическое решение, но является продолжением эйнштейновского подхода к полному объединению разных физических взаимодействий. Конечно, идея многомерной Вселенной (в минимальном варианте пятимерного пространства-времени), была придумана не Эйнштейном, но он положительно воспринял её, прочитав работы двух физиков-математиков Калуцы и Клейна в 1926 г. И хотя сам Эйнштейн не пошёл по их пути, но путь их точно лежал в русле главной идеи общей теории относительности — идеи о том, что физические поля, подобно гравитационному, имеют геометрическую природу.

Давайте проведём простенький мысленный эксперимент с «плоскатиками». Помните, они нам помогли

понять хаббловское расширение Вселенной. Пусть они живут, и ведать не ведают ни о каком третьем измерении. Пусть так же в их собственном двумерном мире нет никаких взаимодействий. Ходят они по своей сфере свободно и вправо, и влево и горя не знают. И реки у них текут, и города богатые на тех реках расцветают. Теперь представим (а им не скажем), что на самом деле есть еще одно измерение, в котором расположен мир «плоскатиков». Давайте начнём вращать его вокруг полярной оси. Поскольку принцип Маха не работает, то «плоскатики» тут же почувствуют это третье измерение. Мир «плоскатиков» изменится. Во-первых, сила притяжения изменится — на полюсе «плоскатики» будут весить больше, чем на экваторе — центробежная сила слегка скомпенсирует их вес. Ну, заметить это будет довольно трудно. А вот с реками и городами начнутся твориться необычные вещи. В северном полушарии постепенно будет подмываться правый берег и становиться крутым, а левый — плоским. А города лучше строить на крутом берегу, потому что город это в первую очередь крепость для защиты от врагов — таких же «плоскатиков» но, злых и коварных. Виной всему — сила Кориолиса[141], которая возникает в неинерциальной системе отсчёта. *(См. вклейку 27)*

Силу Кориолиса можно наблюдать в самой знаменитой лаборатории имени Архимеда — в ванной комнате. Если вы проснулись не в себе, то идите сразу в ванную. Это лучший метод определить, где вы сейчас — в северном или в южном полушарии. По крайней мере, это шаг в правильном направлении, чтобы

[141] Французский учёный Гаспар-Гюстав де Кориолис впервые описал эту силу в статье, опубликованной в 1835 г.

найти место, где вы себя потеряли. После водной процедуры и открывания стока, на поверхности ванны образуется воронка. Если воронка вращается против часовой стрелки, то — в северном, ну и, наоборот, по тексту. Ну и наконец — самый популярный в народе аттракцион — это маятник Фуко, который с неотвратимой неизбежностью вопреки принципу Маха всегда сбивает глупую и наивную пирамидку.

Итак, вы — «плоскатик», вдруг обнаружили в своём двумерном мире новую силу. Кстати сила Кориолиса больше всего напоминает силу Лоренца из электродинамики[142]. А! — воскликнули Теодор Калуца и Оскар Клейн вылезая из ванной, — так вот откуда у нас в четырехмерном пространстве-времени появилось электромагнитное взаимодействие! Как это всё было на самом деле, я, конечно, не знаю, но Калуца первым в 1921 г. записал уравнения Эйнштейна в пятимерном пространстве-времени. А Клейн через 5 лет научился заметать пятое измерение «под ковер» и спроектировал пятимерную Вселенную на наш мир. В результате, о чудо! — появилась сила, похожая на электрическую и магнитную. Т. е. из-за присутствия пятого измерения удалось объединить электромагнитное и гравитационное взаимодействия. По-моему, это самая остроумная идея после работ Эйнштейна по общей теории относительности, придуманная физиками. Но физики-элементарщики бодро шагали вперёд к великому объединению электромагнит-

[142] Ускорение Кориолиса пропорционально векторному произведению скорости движения тела на скорость вращения глобуса. Кориолисова сила, как и сила Лоренца, имеет вихревой магнитный характер и сама по себе не производит работу — ведь она перпендикулярна смещению!

ного, сильного, слабого и ядерного взаимодействий. Блестяще были предсказаны и обнаружены W, Z и хиггсовский бозоны, под грохот барабанов вернулись в физику скалярные поля, несправедливо изгнанные в начале прошлого века.

И вот в начале 70-х гг. прошлого века вдруг вспомнили про многомерность. Однако если перед Калуцей и Клейном стоял вопрос объединения всего двух физических взаимодействий, то за прошедшие полвека число взаимодействий выросло в несколько раз. В результате теоретикам потребовалось не 5, а минимум 11 измерений! Кстати, забавно, что здесь, в конце всей книги, перед самым въездом велосипедиста Пети в град Петров, мы тоже вместе с ним возвращаемся в Петербург. Но только лет эдак на 200 назад, потому что вся теория струн родилась из одной формулы Эйлера, которую сами теоретики долго не могли понять, хоть с успехом применяли в теории элементарных частиц. Сам Эйлер не очень-то интересовался, откуда взялась эта формула. Он её просто выдумал из головы и наслаждался изучением её свойств. Вот как выглядит бета-функция Леонарда Эйлера:

$$\mathrm{B}(x,y) = \int_0^1 t^{x-1}(1-t)^{y-1}\,dt$$

«*Аааааааааааааа*, — закричал Ууфф, — *таки он написал интеграл в научно-популярной книжке*!». Да написал, и стирать не буду и не дам издателю. Почему? Потому что мы сейчас говорим о будущем нашей цивилизации. А будущее может быть светлым только в одном случае — если оно подразумевает новое зна-

ние. Поэтому будущего без образования, без настойчивого изучения высшей математики и физики, у нашей цивилизации нет. Так вот, в 1968 г. молодой физик Габриель Венециано, работавший тогда в ЦЕРНе[143], успешно применил её для описания всех частиц, участвующих в ядерном взаимодействии. Этот чисто феноменологический подход напоминает работу Макса Планка, когда он просто подгонял дробью с экспонентой спектр чёрного тела. Это Эйнштейн через несколько лет показал, что кванты действительно существуют. Точно так же физики обнаружили, что бета-функция Эйлера описывает ядерное взаимодействие, если заменить элементарные частицы некими одномерными струнами (рис. 60).



Рис. 60 Рисовать!

Вернее колебаниями этих струн. Ведь элементарные частицы тоже волны-колебания! Позже обнаружилось, что теория струн — это единственная теория,

[143] ЦЕРН — это просто русская транскрипция от французского названия CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (*Европейский совет по ядерным исследованиям). Именно здесь на Большом Адронном Коллайдере был открыт Хиггсовский бозон.*

которая содержит гравитон — квант гравитационного поля со спином 2, и сотни физиков занялись теорией «Всего». В результате и появилась одиннадцатимерная модель с неким аналогом струны — браной (от слова мембрана), лежащей в одиннадцатимерном пространстве, которая и порождает все взаимодействия. Хотя сама теория суперструн далека от своего завершения и имеет огромные проблемы — представляете, сколько взаимодействий и частиц порождает 11-мерное пространство! Ее уже с успехом применяют к альтернативной теории Большого Взрыва. В этой теории нет никакой сингулярности, а начальный импульс расширения задаёт не распад инфлатона — некоего скалярного первородного поля, породившего инфляцию, а брана в 11-мерном пространстве-времени.

А. Д. Чернин[144] считает, что открытие космической энергии вакуума революционным образом меняет наши представления о глобальном устройстве Вселенной. Космология нашей Вселенной, т. е. Вселенной, заполненной веществом и энергией вакуума, полностью описывается общим решением, впервые открытым А. А. Фридманом (не путать с «фридмановской моделью» — частным случаем решения Фридмана). Динамика мира похожа на скатывание шарика с горы-потенциала **Ф**.

$$\Phi = -A_v^{-2} R^2 - A_d R^{-1} - A_b R^{-1} - A_r^2 R^{-2} .$$

При этом в полном соответствии с законом сохранения энергии сумма кинетической и потенциальной энергии шарика, как и в обычной школьной задаче,

[144] А. Д. Чернин, УФН, 171, 1153—1175, 2001.

остаётся постоянной: $\boldsymbol{v^2/2 + \Phi = const.}$ На рисунке 88 показаны американские («*Русские, сказал бы американец*!» — *Уффф*) горки, по которым могла бы скатиться наша Вселенная. Причём там сразу показаны два сценария — из теории инфляции и из теории суперструн. Начальное раздувание присутствует в обоих случаях и, следовательно, все ложки дёгтя изымаются из нашей бочки мёда, как и в инфляционной модели.

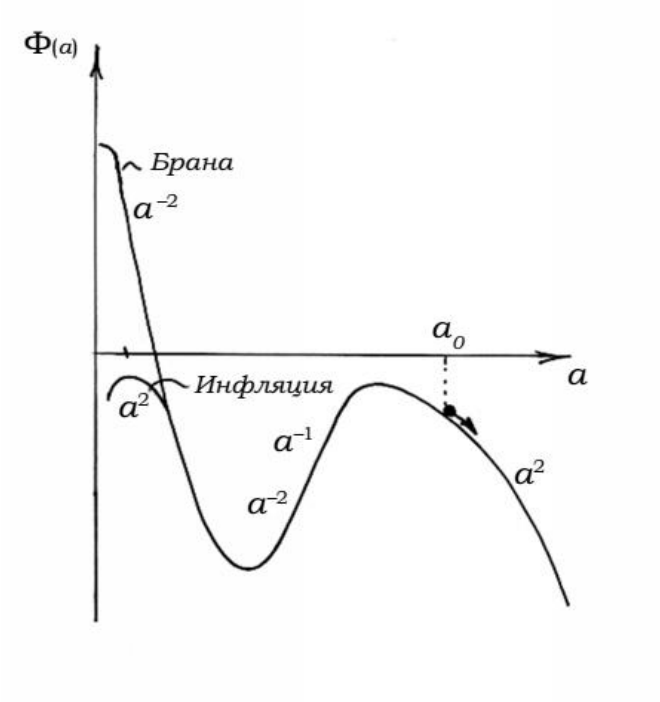


Рис. 61

На рисунке a —масштабный фактор или характерный размер Вселенной. В этой картине современное положение Вселенной соответствует скатыванию по вакуумной параболе вниз.

Сама по себе космология не может ответить на вопрос о том, каким образом появилась наша Вселенная, и почему мы являемся свидетелями её нынешнего ускоренного расширения.

Привлечение внешних по отношению к ОТО гипотез позволило построить, так называемый инфляционный сценарий (Глинер 1965; Глинер и Дымникова 1975; Старобинский 1979; Линде 1981; Гус 1981), в котором расширение возникает вследствие расталкивания обусловленного энергией вакуума. Однако следует подчеркнуть, что после открытия космологического члена инфляционная модель сильно потеряла в своей красоте. Фактически, теперь приходится утверждать, что энергия вакуума является не постоянной величиной, а динамической переменной. Причём начальное значение, которое и привело к раздуванию, на сотню порядков превышает открытое астрономами значение энергии вакуума. Нам кажется эта ситуация искусственной и по сути противоречащей всей идеологии общей теории относительности, в которой космологический член может быть только константой. В этом смысле более привлекательным представляется сценарий с браной, где причина раздувания никак не связывается с энергией вакуума, а является следствием существования браны — некоего двумерного объекта в одиннадцатимерном пространстве. По сути, в потенциале появляется положительный член, растущий в прошлое.

Вообще, мы, не зная природы «начального импульса», можем все-таки наложить определённые ограничения на его абсолютное значение. Чтобы Вселенная могла преодолеть вторичный максимум, обусловленный самопритяжением, необходимо, чтобы первый максимум превышал второй.

Очевидно, будущее нашей Вселенной, если подтвердится постоянство энергии космического вакуума, состоит в полном разлёте вещества, так что про-

странственно-временной каркас с огромной точностью превратится в де-ситтеровский мир — статичный и пустой, описываемый одним числом — **λ**.

Гравитационные волны — открыты!

Сегодня праздник у гравитации,
Громко кричим «Ура!».
Нынче не то, что вчера.
Вышли уже из абстракции
Волны гравитационные,
Отныне вполне законные.

Наталья Ковба

Так случилось, что вашему непокорному слуге в течение трёх последних лет, пишущему урывками эту книгу, довелось принять участие в открытии гравитационных волн. Есть, конечно, закон популяризации — не пиши популярные книги о том, чем занимаешься. Но что делать — недавно мне заказали статью в журнал «Природа», и я таки эту тему уже популярно, как мог, разъяснил. Так что, здесь она появляется не только потому, что автору всё это очень близко, но и потому, что именно гравитационные волны уже, быть может, в недалеком будущем помогут увидеть, как рождалась Вселенная, а возможно, и увидеть то, что было когда Вселенной еще не было.

Среди учёных и открытий, конкурирующих за высшую научную награду в 2017 г., был явный фаворит, и ожидания оправдались: Нобелевская премия по физике присуждена трём американским учёным: Рейнеру Вайсу, Барри Бэришу и Кипу Торну — «за

решающий вклад в создание детектора LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) и наблюдение гравитационных волн»[145].

Премия присуждена трём учёным, но реально сейчас в эксперименте принимают участие более четырёх тысяч человек. Сосредоточимся на вкладе отечественной науки, чему есть особое основание: мне самому удалось поучаствовать как в предсказании 30 лет назад типа источника гравитационных волн, который будет открыт первым, так и в открытии 17 августа 2017 г. сопутствующего электромагнитного излучения. Но прежде чем рассказывать о последних событиях, мы должны вспомнить тех, кто идейно и практически содействовал прямому детектированию гравитационных волн, дебютировавшему в 2015 г.[146]

Начать нужно с того, что сама идея наблюдать гравитационные волны (ГВ) с помощью света и конкретно лазерного излучения в интерферометре Майкельсона, была высказана советскими физиками Михаилом Евгеньевичем Герценштейном и Владиславом Ивановичем Пустовойтом в 1962 г.[147]

---

[145] Вайса и Торна по праву можно назвать «отцами-основателями» проекта LIGO, а Бэриш был его научным руководителем в 1994–2005 гг., во время строительства и начала работы детектора, и организатором коллаборации LIGO (1997).

[146] *Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D. et al.* Observation of gravitational waves from binary black hole merger. Phys.Rev. Lett. 2016; 116: 061102. (Doi: 00319007/16/116(6)/061102).

[147] *Герценштейн М. Е., Пустовойт В. И.* К вопросу об обнаружении гравитационных волн малых частот. ЖЭТФ. 1962; 43: 605–607. [*Gertsenshtein M. E., Pustovoit V. I.* On the detection of low frequency gravitational waves. JETP. 1963; 16: 433–435.]

Конечно, эта работа была инициирована заявлением пионера экспериментальной гравитационно-волновой физики — Джорджем Вебером, первым сообщившим о регистрации гравитационных волн на своём детекторе в Мэриленде (что впоследствии не нашло подтверждения). Значение эксперимента Вебера проглядывает даже в предпосланной к его статье аннотации, которую стоит процитировать: «Показано, что чувствительность электромеханических опытов по обнаружению гравитационных волн при помощи пьезокристаллов на 10 порядков хуже, чем по оценкам Вебера. В области малых частот возможно обнаружение гравитационных волн по смещению полос оптического интерферометра; оценена чувствительность метода». Собственно, сама статья и была в значительной степени посвящена полемике с Вебером — в ней сравнивались два принципиально различных подхода к регистрации ГВ. В одном на гравитационные волны должны были реагировать некие нерелятивистские тела (рабочим телом в установке Вебера был металлический цилиндр, сжатие которого измерялось пьезокристаллами), в другом — релятивистские объекты, например свет. Замечательно, что в этом соревновании разных подходов — твёрдотельного детектора и интерферометра — победил в итоге модернизированный интерферометр Майкельсона. Итак, преуспевший метод обнаружения гравитационных волн основан на идее наших соотечественников — Герценштейна и Пустовойта. Примерно в те же годы раскрылся удивительный талант одного из лучших физиков-экспериментаторов Владимира Борисовича Брагинского, который уже отметился среди тех, на кого ссылались авторы. Позже именно

Брагинский установил так называемый квантовый предел чувствительности приемников ГВ, связанный с соотношением неопределённостей Гейзенберга, которое не позволяет сколь угодно точно измерить положение тела при конечном его импульсе. И он сам, и руководимая им команда физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова приняли участие в создании первого «боевого» гравитационно-волнового интерферометра LIGO. Это второй крупный вклад советских/российских учёных — уже в техническую реализацию детектора ГВ. Можно смело сказать, что без идей Брагинского нынешние Нобелевские лауреаты могли бы и не дожить до открытия ГВ на установке LIGO.

К счастью, Владимир Борисович застал открытие гравитационных волн (и был среди авторов пионерской статьи), но до присуждения Нобелевской премии ни Брагинский, ни Герценштейн не дожили. А здравствующего ныне Пустовойта Нобелевский комитет, к сожалению, в число лауреатов не включил. Вообще, если можно обойти русского учёного, комитет это с удовольствием сделает. Конечно, Владислав Иванович был тогда аспирантом, начинающим учёным. Но среди Нобелевских лауреатов полно бывших аспирантов, а среди отмеченных работ — исследований, выполненных в аспирантуре (ближайший пример по теме — Алан Халс, аспирант Джозефа Тейлора: оба получили премию в 1993 г. за открытие двойного радиопульсара). Увы, подобный российский прецедент ограничивается лишь премией за открытие излучения Вавилова—Черенкова (Павел Алексеевич Черенков сделал его, будучи аспирантом Сергей Ивановича Вавилова).

Об открытии гравитационных волн мир узнал в год столетия их предсказания Альбертом Эйнштейном, датированного 1916 г. Команда МАСТЕР[148] получила информацию на полгода раньше — 16 сентября 2015 г. Глобальная сеть МАСТЕР (Мобильная Астрономическая Система Телескопов-роботов) была приглашена в кооперацию для электромагнитной поддержки эксперимента LIGO/VIRGO в числе 70 установок со всего мира. Наша сеть телескопов превзошла все другие оптические телескопы по площади обзора гравитационно-волнового квадрата ошибок первого события **LIGO GW150914**, покрыв более его половины (около тысячи квадратных градусов), и подтвердила свой статус самой быстрой распределённой по земному шару оптической поисковой системой в мире. *(См. Вклейку 28)*

В последние полгода моя лаборатория космического мониторинга МГУ в содружестве с семью университетами и обсерваториями мира приняла самое живое участие в эксперименте LIGO. Эти полгода — время беспрецедентных в истории астрономии обзоров и обработки в реальном времени изображений, полученных в Южном и Северном полушарии на сети оптических телескопов МАСТЕР. Благодаря уникальному распределению по поверхности Земли и параметрам телескопов, МАСТЕР снова совершил самый обширный, быстрый и глубокий обзор квадратов ошибок LIGO, опередив все другие оптические систе-

[148] Глобальная сеть МАСТЕР (Мобильная Астрономическая Сеть Телескопов Роботов) расположена на 4 континентах. О рождении проекта МАСТЕР см. В. М. Липунов. «Гамма-всплески, русская деревня и первый робот-телескоп в России». Природа. 2006; 10: 26—32.

мы, включая PanSTARR (проект Пентагона и НАСА), iPTF (программа Калтеха и Принстонского университета) и т. д.

Глобальная сеть МАСТЕР обнаружила попутно семь оптических вспышек, заведомо не связанных с гравитационными волнами. Это не удивительно. Честно говоря, я как теоретик и не ждал от источника ГВ никакого оптического излучения. Но как наблюдатель я, конечно, не имел права отступать, и покрытая нами область неба стала самой значительной по сравнению с областями всех обсерваторий мира, участвовавших в программе оптической поддержки LIGO.

День первой регистрации ГВ в 2015 г. был для меня дважды счастливым, потому что тогда не просто были открыты гравитационные волны, но их источником оказались именно две чёрные дыры, слившиеся на наших глазах! Всё дело в том, что как раз мы (я, профессор В. М. Липунов и мои бывшие аспиранты — тоже уже профессора — К. А. Постнов и М. Е. Прохоров) предсказали (посчитали на Машине сценариев, придуманной мною и Корниловым в 1983 г.) в 1997 г. то, что первое событие, регистрируемое на гравитационно-волновых детекторах, будет слияние чёрных дыр. Об этом я напомнил в первом сообщении о начале оптической инспекции МАСТЕРом вероятной области неба, в которой и находился источник ГВ.

История такова. В 1997 г. мы опубликовали (чтобы никто не прошел мимо — в трех статьях) важнейшее предсказание теории эволюции двойных звёзд — первыми на интерферометрах типа LIGO должны наблюдаться сталкивающиеся чёрные дыры. В самых общих предположениях об эволюции двойных звёзд мы посчитали с помощью специального кода Машины

сценариев предполагаемую частоту слияния нейтронных звёзд (1987) и чёрных дыр (1997). Главная идея нашей Машины сценариев состояла в создании компьютерной модели Вселенной, где постоянно рождались искусственные двойные системы, жизнь которых развивалась согласно нашим, быть может, не очень точным (а точная модель никем не создана до сих пор), теоретическим представлениям об эволюции двойных звезд. Начальные параметры систем выбирались абсолютно случайно, методом Монте-Карло[149]. Играя на этой компьютерной рулетке, мы, прежде всего, пытались найти такие параметры эволюции, которые самым оптимальным образом объясняли бы наблюдаемые в реальности стадии эволюции двойных систем. Так, в создаваемой искусственной Вселенной должны на определенном этапе обязательно присутствовать объекты типа Cyg X-1 (чёрная дыра с голубым сверхгигантом), а двойных радиопульсаров с чёрными дырами должно быть мало (их не открыли до сих пор).

Идея расчёта, который никто не смог правильно повторить за 30 лет, была простая, но технически очень сложно выполнимая. (Надо сказать, что Машина сценариев эволюции двойных звёзд на десятилетие обогнала западные исследования в этой области.) Мы «отпустили» все параметры эволюции — скорость отдачи при коллапсе, параметр общей оболочки, начальные параметры звёзд и т. д. И получилось, что как бы мы ни меняли параметры сценария эволюции

[149] Этот математический метод получил название известного игорного места Европы города Монте-Карло из-за главной идеи — идеи решения сложных уравнений методом разыгрывания случайных чисел, как это происходит в рулетке.

двойных звёзд, первыми сигналами на гравитационно-волновом детекторе LIGO станут гравитационные волны, порождённые сливающимися чёрными дырами! Имеет смысл дать русский перевод названия одной из упомянутых статей: «Первые детектируемые события LIGO: слияния чёрных дыр»[150].

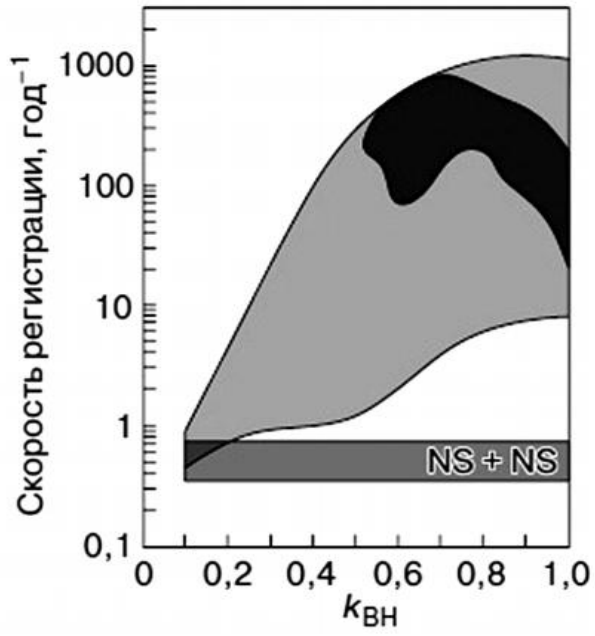


Рис. 62

На рисунке 62 представлен график, который мы в шутку назвали головой динозавра. По вертикальной оси отложена ожидаемая частота регистрации гравитационно-волновых сигналов от слияния двойных нейтронных звезд и черных дыр. Зачерненная область, напоминающая голову доисторического чудовища. — это наиболее вероятная область наших пред-

[150] Lipunov V. M., Postnov K. A., Prokhorov M. E. First LIGO events: binary black holes mergings. New Astronomy. 1997; 2(1): 43–52._

сказаний. Важно, что при всех возможных значениях параметров (один из них, $k_{вн}$, — доля массы звёзды, уходящая в чёрную дыру, — приведён на графике по горизонтальной оси) частота слияния чёрных дыр или чёрных дыр с нейтронными звездами оказывается выше, чем частота столкновения чистых двойных нейтронных звёзд, под которые и строились гравитационно-волновые антенны в США и Италии.

Парадокс состоял в том, что во Вселенной чёрные дыры сливаются (сталкиваются) гораздо реже, чем нейтронные звёзды.

Но за счёт того, что масса чёрных дыр примерно в десять раз больше, горизонт детектора оказывается намного выше. На это впервые обратили внимание советские астрофизики А. В. Тутуков и Л. Р. Юнгельсон, о чём я тогда не знал, но догадался независимо. В Копенгагене, на очередной конференции, Кип Торн, всегда интересовавшийся нашей Машиной сценариев, спросил меня: «А как там чёрные дыры?» И тут я внезапно понял, что чёрные дыры важны для ГВ антенн. К этому времени у нас была самая продвинутая модель эволюции чёрных дыр в двойных системах (мы развивали космологическую модель гамма-всплесков, как сливающихся нейтронных звёзд или нейтронных звёзд с чёрными дырами), и просто надо было приложить её к будущим ГВ детекторам. Я сразу же написал в Москву своим соавторам Постнову и Прохорову с просьбой срочно посчитать частоту событий чёрных дыр — так появилась «Голова динозавра». Мы видим чёрные дыры дальше! А это даёт почти кубическую зависимость — и слияние чёрных дыр должно быть обнаружено первым. Я всегда, рассказывая об этом в популярных лекци-

ях, добавлял, что может появиться первая двойная Нобелевская премия — за открытие гравитационных волн и чёрных дыр.

Наши расчёты положительно оценил Нобелевский лауреат, знаменитый физик Ганс Бе́те. В одной из последних своих работ он писал: «Мы отмечаем качественный популяционный синтез Липунова и др. (1997). В частности, получен важный результат, что ввёденная авторами анизотропия коллапса (скорость отдачи при образовании чёрной дыры) увеличивает частоту слияний чёрных дыр в двойных системах. В то же время Цварт и Юнгельсон (1998) нашли, что чёрные дыры вообще не сливаются». Популяционным синтезом Бе́те занялся в конце жизни, пытаясь простыми аналитическими методами предсказать частоту слияний нейтронных звёзд и чёрных дыр. А мы этот проект начали на 15 лет раньше, построив огромную Машину сценариев, которая и позволила произвести эти расчёты. В 2015 г. выяснилось, насколько они были правильные — они прекрасно подтвердились открытием 14 сентября. Таким образом, предсказание (расчёт) частоты событий при планируемой чувствительности гравитационно-волновых детекторов — тоже в отечественной копилке.

Новая Нобелевская премия 2017 года необычна по многим обстоятельствам. Первое, что бросается в глаза, — решимость Нобелевского комитета, проявленная в рекордно быстром признании заслуг учёных. Случай, невиданный в практике присуждения премий: прошло чуть более двух лет с момента самого открытия ГВ, к которому сначала многие отнеслись скептически (сохранялась некая неопределённость с погрешностью эксперимента). Конечно, уверенно-

сти придали еще три события слияния чёрных дыр, зарегистрированные за прошедшие два года. Но немалую роль здесь сыграло и открытие оптического излучения от столкновения нейтронных звёзд 17 августа 2017 г. Знаю это по общению с «релятивистами». Некоторые сетовали, что, мол, от обнаруженных событий нет никакого другого подтверждения, кроме самих гравитационных волн! Недаром Торн, посетивший нашу лабораторию в ГАИШ МГУ в 2016 г., написал на доске пожелание, чтобы наши телескопы открыли оптический двойник гравитационных волн. *(См. вклейку 29).*

И МАСТЕРу это удалось: 17 августа 2017 г. наш прибор оказался среди нескольких телескопов, установленных в Южной Америке, которые независимо обнаружили первое оптическое изображение источника ГВ (вернее того, что от него — источника — осталось).

Примерно в полдень по всемирному времени (если быть точным, в 12:41:04.44) два детектора LIGO и детектор Virgo в Италии впервые зафиксировали гравитационно-волновой импульс от двух сталкивающихся нейтронных звёзд, расположенных на расстоянии 120 млн св. лет. Через две секунды гамма-обсерватории НАСА Fermi (и впоследствии аппарат ЕКА Integral) зарегистрировала короткий импульс гамма-излучения — гамма-всплеск. Через 10 ч 15 мин российский телескоп-робот Глобальной сети МАСТЕР, расположенный в обсерватории Феликса Агилара (Аргентина), первым начал съёмку квадрата ошибок источника ГВ и получил сверхширокопольными камерами первое изображение галактики после произошедшего в ней столкновения нейтронных звёзд. А ещё через полтора

часа (в 23 ч 59 мин) он натолкнулся на галактику NGC 4993, в которой нашёл новый объект 17,5 звёздной величины (что по принятой шкале отвечает килоновой) — MASTER OT J130948.10–232253.3. На вклейке 30 показан снимок телескопов-роботов Глобальной сети МАСТЕР, расположенных в ЮАР и Аргентине. Килоновоую, возникшую на месте столкновения двух нейтронных звёзд 17 августа 2017 г. поймал телескоп МАСТЕР в Аргентине, и независимо несколько американских телескопов, расположенных в Чили. *(См. вклейку 30)*

В момент съёмки в Москве была глубокая ночь, и сначала об открытии объекта SSS17a в галактике NGC4993 в GCN заявила группа американского метрового телескопа Swope, установленного в Чили. Замечательно, что обнаруженный источник ни по поведению, ни по яркости, ни по спектру не был похож ни на какую из исследованных сверхновых. Полученные вскоре оптические спектры подтвердили: оболочка килоновой разлетается со скоростью 100 000 км/с (это треть скорости света!), что соответствует второй космической скорости на поверхности нейтронных звёзд.

Таким образом, 17 августа 2017 г., астрономы и физики практически одновременно впервые наблюдали столкновение двух нейтронных звёзд и его последствия в галактике NGC 4993 не только в гравитационно-волновом канале, но и в нескольких диапазонах электромагнитного излучения — гамма, рентгеновском, ультрафиолетовом, оптическом и инфракрасном. В этом отношении столкновения нейтронных звёзд информативнее, и значит, интереснее, чем слияние чёрных дыр, гравитационные волны от

которого были зарегистрированы первыми (в таком событии излучения электромагнитных волн не происходит). Поэтому совершим небольшой экскурс в историю изучения нейтронных звёзд, где тоже очевиден весомый вклад советских ученых.

Нейтронные звёзды — первый класс астрономических объектов, существование которых было предсказано теоретически и подтверждено наблюдениями. Идею о том, что в природе должны существовать гигантские атомные ядра с массой больше массы Солнца и размером около 10 км, Лев Давидович Ландау высказал в 1932 г. ещё до открытия нейтронов британцем Джеймсом Чедвиком. Через два года, в 1934 г., американские астрофизики Вальтер Бааде и Фриц Цвикки дали им название — нейтронные звёзды — и высказали предположение, что они рождаются в результате катастрофического коллапса (гравитационного сжатия), который, в свою очередь, сопровождается вспышкой Сверхновой звезды. Учёные прямо указали на Крабовидную туманность, которая образовалась в результате вспышки сверхновой, наблюдавшейся китайскими астрономами в 1054 г. Именно здесь, в Крабовидной туманности, через 35 лет был обнаружен самый молодой радиопульсар — быстровращающаяся нейтронная звезда.

В 1966 г. Яков Борисович Зельдович и Игорь Дмитриевич Новиков нашли физический процесс, который мог бы сделать эти микроскопические по масштабам звёзд объекты с радиусом порядка 10 км яркими источниками электромагнитного излучения. Этот процесс — падение окружающего вещества на нейтронную звезду — был вскоре предложен Иосифом Самуиловичем Шкловским как объяснение приро-

ды самого яркого рентгеновского источника Sco X-1. Почти в то же время Николай Семенович Кардашёв и итальянский астрофизик Франко Пачини нашли ещё один источник энергии замагниченной нейтронной звезды — запасённую во время коллапса её вращательную энергию. Так нейтронные звезды, родившиеся на кончике пера, стали научной гипотезой, прямо подтверждённой после открытия радиопульсаров (англичанином Энтони Хьюишем, Нобелевская премия 1974 г.) и рентгеновских пульсаров (американским физиком итальянского происхождения Риккардо Джаккони, Нобелевская премия 2002 г.).

После уже упоминавшегося открытия двойного радиопульсара австралийскими радиоастрономами Халсом и Тэйлором стало ясно, что во Вселенной идёт процесс столкновения нейтронных звёзд, поскольку время слияния этой двойной звезды было меньше её возраста.

Процесс столкновения двух нейтронных звёзд — этих сверхтяжёлых атомных ядер — напоминает столкновение элементарных частиц в коллайдерах, но выделяющаяся энергия в этом случае несравненно выше. Фактически столкновение нейтронных звёзд наряду со слиянием чёрных дыр представляет собой самый мощный процесс во Вселенной, сопровождающийся гравитационно-волновым импульсом. Именно поэтому Торн, главный идеолог проекта LIGO, начал продвигать идею ГВ детектора еще в 80-е гг.

Естественно, возник вопрос: как часто такие процессы идут во Вселенной? Говоря языком физики элементарных частиц, надо было рассчитать сечение самых мощных космических реакций.

Первые попытки оценить темп слияния нейтронных звёзд в нашей Галактике, исходя из общих пред-

ставлений об эволюции двойных систем вплоть до образования в них релятивистских звёзд, оказались довольно приблизительными из-за большого числа трудно оцениваемых вероятностных коэффициентов. Полученные значения не вдохновляли: всего 10^{-4}–10^{-6} слияний в год.

И здесь помогла наша Машина сценариев. Это случилось благодаря невиданной концентрации астрофизической мысли вокруг нашего выдающегося соотечественника Якова Борисовича Зельдовича. Да и сам будущий вдохновитель проекта — Кип Степанович Торн (так его называли в группе Зельдовича) — идею эту почерпнул на семинарах Якова Борисовича (сейчас — Общемосковский семинар астрофизиков имени Я. Б. Зельдовича), к которому он регулярно приезжал с 60-х гг. Здесь же Торн познакомился с Владимиром Борисовичем Брагинским, руководителем группы физиков физического факультета МГУ, которая внесла, как уже упоминалось, неоценимый вклад в успех гравитационно-волнового эксперимента. Узнал Торн в один из своих визитов и о нашей новой разработке (мы усовершенствовали Машину сценариев) и попросил посчитать вероятность столкновения двойных нейтронных звёзд.

Так появился первый расчёт вероятности столкновения нейтронных звёзд в нашей Галактике. Оказалось, что подобная коллизия должна случаться каждые 10 тыс. лет. Следовательно, чтобы открыть гравитационные волы от сливающихся нейтронных звезд, надо выбрать дальность приёма антенны, захватывающую область, в которой живут, по крайней мере, 10 тысяч галактик. Её радиус был оценен в 20 Мпк (60 млн св. лет). Тогда хотя бы раз в год

удастся зарегистрировать ГВ. Но лучше, конечно, получить хотя бы несколько событий в год, для чего надо увеличить горизонт интерферометра до 40 Мпк. Отметим, что в ряде зарубежных работ утверждалось, что темп слияний в 10—100 раз ниже.

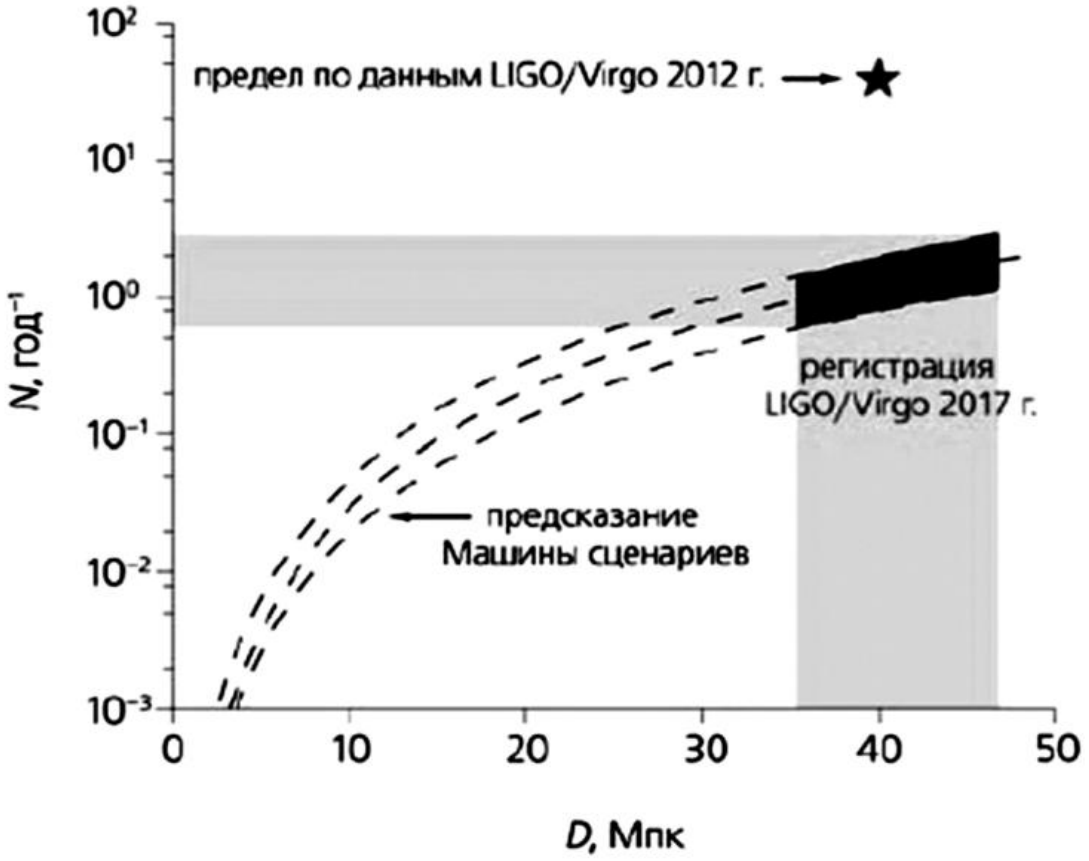


Рис. 63

На рисунке 63 показан весьма красноречивый график — зависимость частоты столкновения нейтронных звёзд от радиуса горизонта чувствительности антенны. Тремя штриховыми линиями показаны расчёты Машины Сценариев с учётом всех неопре-

делённостей. Вертикальная серая полоса — это расстояние до галактики NGC4993, в которой произошло столкновение нейтронных звёзд. Ширина полосы показывает ошибки измерения этого расстояния астрономами. Горизонтальная полоса показывает предсказываемую частоту слияний НЗ в объёме, соответствующем расстоянию до галактики. Как видим предсказание — несколько событий в год — отлично согласуется с открытием 17 августа 2017 года.

А на вклейке 31 вероятность события показана в пространственных координатах: сценарии эволюции двойных звёзд разыгрывались на карте галактического неба. Эта карта была построена нами до расстояний в 50 Мпк еще в 1995 г. на основе модели локальной Вселенной и самого точного каталога галактик Тулли. Только что открытое первое слияние нейтронных звёзд попадает во вполне ожидаемое место. Красный кружочек с подписью-названием события GW170817. Интересно и другое совпадение. Полная скорость слияния на всём небе на этой карте равна трём событиям в год. А ведь LIGO обнаружила первое слияние, проработав всего треть года — отличный прогноз!

Итак, день 17 августа 2017 г. может по-настоящему считаться днем рождения новой науки — гравитационно-волновой астрономии[151]. Удалось сделать самое главное: локализовать место ГВ события с астрономической точностью: лучше одной угловой секунды! В прошлом веке астрономия гамма-вспле-

[151] Случайное совпадение состоит в том, что паспорте автора этой статьи, в графе «дата рождения» стоит 17 августа 1952 г. Спасибо LIGO/Virgo за подарок к юбилею.

сков никак не могла появиться на свет почти 30 лет. Именно столько времени понадобилось физикам и астрономам, чтобы найти оптические двойники гамма-всплескам. В случае же гравитационных волн эта метаморфоза заняла всего два года, а если говорить о самом открытии — всего полдня. Почему так важна точная локализация? Потому, что с момента установления точного места происшествия, к новому явлению, наконец, может быть применён весь тысячелетний опыт старейшей из наук — астрономии (или, по крайней мере, опыт последнего столетия — самого бурного и революционного). Локализация позволила установить галактику, в которой произошла мощнейшая катастрофа. Ею оказалась галактика типа S0 под номером NGC4993. Что это за галактика?

Замечательный российский астрофизик Игорь Дмитриевич Караченцев с соавторами посвятил немало времени исследованию этих немного нетипичных галактик. С виду (особенно плашмя, как мы и видим NGC4993) они напоминают спиральные галактики, правда, с очень слабыми спиралями. Спирали формируются молодыми звёздами, а здесь их практически нет! Получается, короткий гамма-всплеск родился в галактике, где нет массивных звёзд. Но сами нейтронные звёзды, столкновение которых там наблюдалось, — продукт эволюции именно массивных звёзд. Только последние жили миллиарды лет назад, и, следовательно, можно примерно установить биографию этой парочки.

Получается следующая картина: примерно 10 млрд лет назад, когда шло первичное бурное звёздообразование, в галактике NGC4993 возникла система из двух голубых звёзд-сверхгигантов. Понадобилось не

больше 100 млн лет, чтобы в системе прогремели два взрыва сверхновых, сопровождавшихся образованием нейтронных звёзд, как это и предположили Бааде и Цвикки. Чудом система не распалась. Такие чудеса точно происходят в нашей Галактике раз в 10 тыс. лет, и как раз в результате столь редкого события образуется двойная нейтронная звезда — одна, а иногда и обе становятся вначале радиопульсарами, и довольно быстро, за 10 млн лет, замедляются и гаснут. Потом долгие миллиарды лет они сближаются, и только совсем недавно, примерно 100 млн лет назад, когда по Земле ещё бегали динозавры, произошло катастрофическое слипание, сопровождающееся мощным импульсом гравитационных волн, гамма-излучения, явлением килоновой, рентгеновским послесвечением и радиосвечением. Вот такой фейерверк позволяет всем отраслям астрономии нацелиться на событие 17 августа прошлого года и на базе всего накопленного опыта сказать своё веское слово — не зря же 16 октября, в день пресс-конференции научного фонда США, когда было снято эмбарго, мы увидели сотни научных статей, посвящённых этому феномену. Среди них появилась и одна работа в журнале Nature, в числе авторов которой вы найдёте участников проекта МАСТЕР.

Эта работа[152] посвящена первому в истории определению постоянной Хаббла с помощью стакивающихся нейтронных звёзд. Дело в том, что если получить ГВ сигнал от сталкивающихся объектов, то автоматически находится расстояние до них. Почему? С одной сторо-

[152] Abbott, B. P.; et al., A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant, Nature, Volume 551, Issue 7678, pp. 85–88 (2017).

ны, амплитуда гравитационной волны в любой момент времени определяется массой вступивших в «реакцию» слияния звёзд и расстоянием до них. С другой стороны, частота гравитационной волны — это удвоенная частота орбитального вращения, которая определяется только массами звёзд (третий закон Кеплера) и расстояниями между ними. Из этих двух условий можно найти и массы, и удаление от Земли данного слияния. Таким образом, регистрируя ГВ от двойной системы, можно тут же определить расстояние до неё.

Но если слияние сопровождается оптической вспышкой и известно, в какой галактике она происходит, можно измерить красное смещение и найти скорость удаления галактики от нас, используя закон Хаббла, и расстояние. Итак, мы имеем два независимых уравнения для расстояния и постоянной Хаббла. Понятно, что из двух уравнений можно рассчитать последнюю.

Конечно, первое измерение оказалось не очень точным, но по мере работы интерферометров LIGO/Virgo и, соответственно, регистрации новых и новых событий слияния, мы будем иметь один из самых точных методов определения постоянной Хаббла, важнейшей характеристики нашего мира.

И это лишь одно из многих научных следствий нового открытия, удостоенного Нобелевской премии 2017 г.

Не за горами строительство космических гравитационно-волновых антенн, которые позволят ловить космологические гравитационные волны. Гравитационные волны практически не поглощаются, и с их помощью можно будет заглянуть в самые первые моменты рождения нашей Вселенной, а возможно и ещё раньше, когда её и не было!

Строить оптические супертелескопы!

В настоящее время вовсю идёт строительство гигантских оптических телескопов. Напомню, что каждый век, начиная с эпохи Возрождения, сопровождался строительством рекордных телескопов. Когда-то первым был паломарский пятиметровик, потом первым стал шести метровый телескоп Специальной Астрофизической обсерватории СССР. Сейчас целая плеяда телескопов диаметром под десять метров работает день и ночь. *(См. вклейку 32)*

Мне, как руководителю Глобальной сети малых телескопов-роботов МАСТЕР нелегко говорить о том, нужны ли сейчас телескопы-гиганты или нет. Но я скажу: несомненно, нужны. Правда, такие «машины» уже стоят несколько миллиардов долларов. И где взять такие деньги?

Несколько лет назад один из миллионеров российского происхождения решил при поддержке Стивена Хокинга искать братьев по разуму. Свежая идея состоит в том, чтобы влить пару миллионов долларов в программу прослушивания космоса радиотелескопами. Идея эта очень плохая. Это все равно, что плыть с Колумбом в Америку в надежде встретить на ее берегах Александра Степановича Попова с его приёмником радиоволн. При этом исследователи и меценаты решили подстраховаться. Стивен Хокинг — умный человек, и поэтому сразу предложил никаких сигналов особо не слать, так как пришельцы, скорее всего, могут обогнать нас лет на 1000, и тогда мы все на своей коже поймем, что чувствовали туземцы, когда их доставала стальная рука испанского конквистадора.

Но как показывает парадокс Ферми, скорее всего мы ничего не услышим, так как ни доисторический папоротник, ни динозавры сроду не излучали никаких радиоволн.

Великое Молчание Вселенной связано либо с короткой шкалой жизни технологических цивилизаций, либо с тем, что мы одни во Вселенной. Так стоит ли в такой ситуации тратить деньги на поиск Внеземной Жизни? Конечно, да. Понятно, что наивно искать именно цивилизацию, похожую на нашу. Технологическая фаза похожести пролетает за время **τ ~ 100 лет**, а человек на Земле появился несколько миллионов лет назад. Следовательно, найти пращуров, почти приматов, в 10 000 раз вероятнее, чем пользователей Интернета. Однако примитивная жизнь появилась ещё раньше — наверное, миллиард лет назад, и, следовательно, только в 10 млн случаев, вместо разумной жизни, вы натолкнётесь на папоротники и на стрекоз с размахом крыла как у боевых дронов.

Что же делать? Надо обратиться к теории вероятности. Понятно, что только на одной из миллиона планет можно встретить наших современников. Надо попытаться найти примитивную жизнь вне Земли. Самым лучшим способом для этого является строительство гигантских телескопов, способных разглядеть ЭкзоЗемли и открыть на них следы жизнедеятельности. Я уверен, что примитивная жизнь просто кишит на Экзопланетах и её наличие можно будет обнаружить по присутствию особых спектральных линий характерных для биогенеза (спектральных биомаркеров). Во всяком случае, открытие даже примитивной жизни приблизит нас к разгадке Великого Молчания.

Несколько лет назад я выдвинул у себя в обозрении[153], и поддержал на комиссии РАН, РНФ по перспективам развития российской астрономии идею построить совместный с Испанией супертелескоп «Гагарин» — самый крупный в мире (и таким он останется весь XXI в.), который позволит обнаружить жизнь во Вселенной и решить многие фундаментальные проблемы мироздания.

При этом Россия будет обладать 80 % наблюдательного времени и в ходе строительства приобретёт и разработает новые уникальные технологии.

Это не фантазии. Один русский телескоп уже стоит на Канарских островах. *(См. вклейку 33)*

Телескоп-робот МАСТЕР на Канарских островах за два месяца, прошедших с момента установки, обнаружил более 20-ти новых взрывов во Вселенной и первым в оптическом диапазоне «увидел» вспышку чёрной дыры в созвездии Лебедя. Ровно через год впервые обнаружил поляризацию оптического излучения гамма-всплесков![154]

Вот в чём суть нашего проекта, который мы написали совместно с испанскими коллегами. Так же, как Гагарин стал первым человеком, увидевшим Землю из Космоса, этот телескоп, который мы назвали Супертелескопом «Гагарин» (Gagarin Super Telescope — GST), может стать первым, благодаря которому мы с нашей планеты сможем увидеть новые обитаемые миры.

Строительство телескопа «Гагарин» станет достойным продолжением эпохального начинания России —

---

[153] http://www.pereplet.ru/lipunov/

[154] E.Troya,V. Lipunov et al., Nature, 2017, 547, 425–427.

отправки человека на орбиту Земли. Его улыбка может быть увековечена сооружением самого большого телескопа, который когда-либо существовал на нашей планете. Важно, что телескоп «Гагарин» так и останется самым большим телескопом мира. Предполагаемый диаметр главного зеркала 60 м. Адаптивная оптика. Спектроскопия. Детальный дизайн разрабатывается. Телескоп будет масштабирован в 6 раз с самым крупным современным телескопом Большим Канарским Телескопом — конечно, с учётом новых технологий и материалов.

В России вплоть до 1993 г. стоял крупнейший в мире шестиметровый телескоп (до 10-ти метрового keck, введённого в 1993 г.). Но он расположен не в самом удачном месте. Построив гигантский телескоп «Гагарин» на Канарских островах, где сейчас стоит крупнейший в мире телескоп, Россия опять займёт лидирующее место в мире. Есть большая разница между телескопом «Гагарин» и европейским ELT и американским TMT гигантскими телескопами. Телескоп «Гагарин» находится в северном полушарии. Единственным конкурентом станет американский TMT, но он в два раза меньше. Россия, как я уже говорил, будет иметь 80 % времени. Можно делать долговременные программы. Что практически невозможно при большом количестве стран-участников (как в ELT). Большая часть бюджета для построения GST будет вложена в российские предприятия. Бюджет телескопа «Гагарин» (60 м) составляет ~1 млрд долларов. Для сравнения ELT (39 метров) — 1,2 млрд долларов — с учётом огромной удалённости и более высокой цены оптики. Кроме того, существенное уменьшение затрат — это отсутствие

такой сильной опасности землетрясений как в Чили, что упрощает требования к механике и архитектуре телескопа. В сумме это может дать экономию в 400 млн Euro по сравнению с чилийским проектом. Срок изготовления — 10 лет.

GST (Супертелескоп «Гагарин») может стать импульсом для новых поколений русских учёных и инженеров и откроет для них новые, необъятные горизонты. Но он также сможет стать мощным толчком для производства в смежных индустриях, без которых невозможно развитие астрофизики. В России существует блестящая традиция оптической и теоретической астрофизики. Россия также может гордиться своим заводом оптического стекла в Лыткарино (ЛЗОС, Московская область). Благодаря GST, ЛЗОС может вполне стать одним из крупнейших заводов оптического стекла в мире и производить стёкла для самых масштабных проектов будущего.

Кроме того разработка новых технологий неизбежно приведёт к огромному количеству патентов, новых инженерных идей и развитию инновационных технологий, и т. д. Конечно, прошло уже полвека с создания крупнейшего телескопа в СССР и мире. Однако Россия должна развивать собственные технологии будущего, а наше подрастающее поколение учёных и инженеров должно иметь великие цели, какие имели мы! Долговременное, гарантированное на государственном уровне сотрудничество, приведёт к созданию новых школ в России. Например, только создание математического обеспечения контроля телескопа — это 150 млн долларов, которые можно вложить в МГУ имени М. В. Ломоносова (мехмат, ВМК, НИВЦ) и в компьютерные организации в Сколково.

Национальные институты и университеты могут быть подключены к проекту.

Наблюдатели России немедленно (после начала проекта) получат серьёзнейшую коллаборацию с испанскими астрономами и гарантированно получат доступ к Большому Канарскому Телескопу — самому большому телескопу мира. Россия имеет серьезнейшую школу наблюдателей-астрономов. Испания готова финансировать обмен студентами и аспирантами для совместной подготовки к работе с гигантским телескопом «Гагарин». При этом русские астрономы получат прямой доступ ко всем телескопам Канарских островов за счёт испанских квот. В конце концов, проект откроет новые горизонты дружественных политических отношений с европейскими странами.

«Гагарин» это инструмент, который с лёгкостью может преодолеть все большие проблемы, стоящие перед современной астрофизикой. Гигантские размеры его первичного зеркала и потрясающее качество, которое обеспечат его более 1000 зеркал, интегрированных в активную оптику и улучшенных с помощью новейших технологий адаптивной оптики впервые позволят увидеть экзопланеты типа Земли.

Гагарин стал первым человеком, который увидел Землю из Космоса. Телескоп, названный его именем, станет первым искусственным глазом, который впервые даст нам увидеть другую Землю, вращающуюся вокруг другого Солнца. Многие вопросы, которыми задаются сегодня астрофизики, решатся с помощью этого мощного орудия — GST. Мы сможем больше узнать о чёрных дырах в центре галактик, на гигантских, даже по космическим меркам, расстояниях от нас. Мы поймём, как растёт чёрная дыра нашей Галактики, увидим

сверхмассивные чёрные дыры, мы проверим на практике теорию относительности. GST позволит нам увидеть самые далёкие сверхновые и измерить скорость расширения Вселенной, он найдёт первые скопления галактик и первые галактики. GST поможет нам понять физику зарождения Вселенной и разгадать тайны тёмной материи и тёмной энергии. Всего лишь за долю секунды GST сможет получать абсолютно чёткие снимки облаков в атмосфере планет Солнечной системы, их вулканов и колец Сатурна, проводить метеорологические и геофизические исследования этих феноменов и производить длинные серии снимков при очень маленьких затратах. Американское и Европейское космические агентства будут крайне зависеть от этого телескопа. Многие космические эксперименты будут нуждаться в услугах телескопа «Гагарин».

Есть ещё один важнейший аспект, который, быть может, сыграет решающую роль в будущем. В XXI в. началось строительство роботизированных поисковых телескопов, которые уже обнаружили тысячи оптических транзиентов, в том числе не наблюдавшихся раннее. Человечество приступило к синоптическому мониторингу Вселенной и уже сейчас вводятся в строй и планируются крупные поисковые широкоугольные телескопы, способные обнаруживать миллионы слабых взрывов на космологических расстояниях, спектры которых могут получать телескопы только гагаринского масштаба. Короткие транзиенты (менее 1 ч) требуют распределённых систем и «Гагарин» будет важен для северного неба не только потому, что он будет в 2 раза больше американского телескопа на Гавайях, но и потому, что уникальные явления могут протекать только в данном месте и в данное время.

Речь идёт о наблюдении сталкивающихся нейтронных звёзд и чёрных дыр, и других процессах, о которых, быть может, мы и не подозреваем. Телескоп «Гагарин» может «рассмотреть» опасные для цивилизации малые тела Солнечной системы на рекордных от Земли расстояниях, что, быть может, спасёт саму цивилизацию.

Сразу после вхождения «Гагарина» в строй, начнётся поиск биомаркеров на планетах у других звёзд, находящихся в зоне обитания. К концу 20-х гг. будет накоплен банк данных планет, которые наиболее приспособлены к появлению жизни. Они будут подвергнуты детальной спектроскопии, которая позволит решить важнейшую проблему нашей цивилизации — является ли она единственной во Вселенной. Если нет, то каковы её шансы выжить в эпоху постттехнологической революции. Напомним, что пока наши знания об экзопланетах в основном накоплены на северном небе (Созвездие Лебедь и космический эксперимент «Кеплер»).

Если мы не хотим навсегда отстать от развитых стран мира в новых космических и астрономических технологиях, мы обязаны начать крупный мирового значения проект, который с энтузиазмом встретят молодые кадры, выпускаемые нашими ведущими центрами (по-прежнему работающими на высоком уровне). Наши выпускники работают сейчас в лучших мировых центрах: Кембридж, Калтех, Массачусетс, Ферми-Лаб, Институт имени Макса Планка и т. д. Но, до каких пор мы будем готовить кадры для зарубежья, оголяя одну седьмую часть суши, некогда открывшую космос человечеству, превращая её в пустыню?

Строительство крупнейшего в мире телескопа «Гагарин» на Канарских островах важно не только для

всех астрономов России, но и для всей нашей страны. Проект, стоимостью 1 млрд долларов — дешевле нескольких футбольных клубов типа Челси, сделает на полвека Россию мировым лидером астрономических технологий. То же можно сказать и о странах, которые примут участие в нашем проекте. Проект поддержали Его Величество Король Испании Филипп VI, Дирекция Института Астрофизики Канарских островов, первый человек, вышедший в открытый в космос — космонавт Алексей Леонов.

Строить ракеты и осваивать Солнечную систему...

«Многие думают, что я хлопочу о ракете и беспокоюсь о судьбе из-за самой ракеты. Это было бы глубочайшей ошибкой. Ракеты для меня только способ, только метод проникновения в глубину космоса, но отнюдь не самоцель. Не доросшие до такого понимания вещей люди говорят о том, чего не существует, что делает меня каким-то однобоким техником, а не мыслителем. Так думают, к сожалению, многие, кто говорит или пишет о ракетном корабле».

Э. К. Циолковский.
Из записи А. Л. Чижевского,
«Теория космических эр».

50 лет назад человечество вышло в космос. Юрий Гагарин стал гражданином Вселенной, быть может, первейшим во всей этой Вселенной! Сейчас, через полвека космических исследований, когда мы узнали, что в ней миллиарды «Земель», вопрос о судьбе разума во Вселенной становится ещё более загадочным.

Но что имел в виду Константин Эдуардович, рассказывая Чижевскому о космосе? Какие сверхзадачи мечтал решать Циолковский с помощью своей ракеты, которую позже построил Сергей Павлович Королев и на которой полетел Юрий Алексеевич Гагарин? Если вы никогда не думали над этим, то воспользуйтесь этой книжкой, хотя бы, как поводом.

Странное мистическое совпадение. Основоположник русского «космизма» Николай Фёдорович Фёдоров[155], за 30 лет до Циолковского, работал в той самой Боровской школе учителем.

Его «философия общего дела» — это одна из величайших утопий человечества — сдвинула не только Циолковского, но миллионные русские массы, к тяжелейшему упорному космическому труду. Конечно, была задача доставить бомбу на ракете. Но такие задачи постоянно ставят правительства мировых стран. Но и Королёвы не появляются каждый день! Чтобы возник Королёв, необходимо было идейное братство Фёдорова—Циолковского. Нужна была русская бескрайняя почва, не терпящая пределов воображения.

Фёдоров писал в заметке «Иго Канта»:

«Освободится ли Запад от ига и гнёта кантовой критики, на сословном суеверии и предрассудке основанной, на суеверии сословия, обречённого на бездействие и осуждённого на одно мышление, на предрассудке, обрекающем род человеческий на вечное несовершеннолетие?»

И далее:

---

[155] Удивительное совпадение: Николай Фёдоров, как внебрачный сын князя Павла Ивановича Гагарина (из рода Рюриковичей), получил фамилию крёстного отца.

«...Кант — представитель старости, переходящей в младенчество. Хотя он и восхищается небесным сводом, но доступ в него закрывает человеческому роду. Восхищается он и пустым, лишённым всякого содержания долгом; но он истинный враг простора и шири. Ему, философу безнадёжности и отчаяния, всюду мерещатся грани и пределы, которые он и налагает на все области жизни, на мысль и на деятельность. Освободится ли Запад от ига «критики» Канта?...».

Русский космос не возможен без сострадания и сочувствия (именно сострадание к предкам и явилось импульсом философии общего дела Фёдорова), он обитаем моральными догмами и человеческими чувствами. Русская философия невозможна без человека и его поступка.

Вот первый спутник, запущенный русским воображением:

«...однако я был, ещё бог знает, где, и чтобы попасть к вам на Землю, предстояло ещё перелететь пространство... конечно, это один только миг, но ведь и луч света от Солнца идёт целых восемь минут, а тут, представь, во фраке и в открытом жилете. Духи не замерзают, но уж когда воплотился, то... словом, светренничал, и пустился, а ведь в пространствах-то этих, в эфире-то, в воде-то этой, яже бе над твердию, — ведь это такой мороз... то есть, какое мороз, — это уж и морозом назвать нельзя, можешь представить: сто пятьдесят градусов ниже нуля! Известна забава деревенских девок: на тридцатиградусном морозе предлагают новичку лизнуть топор; язык мгновенно примерзает, и олух в кровь сдирает с него кожу; так ведь это только на тридцати градусах, а на ста-то пятидесяти, да тут только палец, я думаю, приложить к топору, и его как не бывало, если бы... только там мог случиться топор...

— А там может случиться топор? — рассеянно и гадливо перебил вдруг Иван Федорович. Он сопротивлялся изо всех сил, чтобы не поверить своему бреду и не впасть в безумие окончательно.

— Топор? — переспросил гость в удивлении.

— Ну да, что станется там с топором? — с каким-то свирепым и настойчивым упорством вдруг вскричал Иван Федорович.

— Что станется в пространстве с топором? Quelle id.e! Если куда попадёт подальше, то примется, я думаю, летать вокруг Земли, сам не зная зачем, в виде спутника. Астрономы вычислят восхождение и захождение топора, Гатцук внесёт в календарь, вот и всё.

— Ты глуп, ты ужасно глуп! — строптиво сказал Иван, — ври умнее, а то я не буду слушать. Ты хочешь побороть меня реализмом, уверить меня, что ты есть, но я не хочу верить, что ты есть! Не поверю!!

— Да я и не вру, всё правда; к сожалению, правда почти всегда бывает неостроумна. Ты, я вижу, решительно ждёшь от меня чего-то великого, а может быть и прекрасного. Это очень жаль, потому что я даю лишь то, что могу...

— Не философствуй, осел!»

Этот проект спутника сочинён Фёдором Михайловичем Достоевским и вложен в мятущуюся душу Ивана Карамазова.

Но вернёмся к Циолковскому: «Многие думают, что я хлопочу о ракете и беспокоюсь о судьбе из-за самой ракеты. Это было бы глубочайшей ошибкой. Ракеты для меня только способ, только метод проникновения в глубину космоса, но отнюдь не самоцель. Не доросшие до такого понимания вещей люди говорят о том, чего не существует, что делает меня каким-то

однобоким техником, а не мыслителем. Так думают, к сожалению, многие, кто говорит или пишет о ракетном корабле. Не спорю, очень важно иметь ракетные корабли, ибо они помогут человечеству расселиться по мировому пространству. И ради этого расселения я хлопочу. Будет иной способ передвижения в космосе — приму и его... Вся суть — в переселении с Земли и в заселении Космоса. Надо идти навстречу, так сказать, космической философии! К сожалению, наши философы об этом совсем не думают. А уж кому-кому, как не философам следовало бы заняться этим вопросом. Но они либо не хотят, либо не понимают великого значения вопроса, либо просто боятся. И то возможно! Представьте себе философа, который боится! Демокрита, который трусит! Немыслимо!

Дирижабли, ракеты, второе начало термодинамики — это дело нашего дня, а вот ночью мы живём другой жизнью, если зададим себе этот проклятый вопрос.

Говорят, что задавать такой вопрос — просто бессмысленно, вредно и ненаучно. Говорят — даже преступно. Согласен с такой трактовкой... Ну, а если он, этот вопрос, всё же задастся... Что тогда делать? Отступать, зарываться в подушки, опьянять себя, ослеплять себя? И задается он не только здесь в светёлке Циолковского, но некоторые головы полны им, насыщены им — и ужо не одно столетие, не одно тысячелетие... Этот вопрос не требует ни лабораторий, ни трибун, ни афинских академий. Его не разрешил никто: ни наука, ни религия, ни философия. Он стоит перед человечеством — огромный, бескрайний, как весь этот мир, и вопиет: зачем? зачем?...»

Знал ли обо всём этом Гагарин? Нет, конечно, умом нет, не знал. Но наша Вселенная именно 12 апреля

1961 г. вдруг осветилась такой человеческой, такой неожиданной для глубин Мироздания, теперь вечно летящей по её бескрайним Вселенным, русской улыбкой.

Космические перспективы

«Мы не найдём ничего такого же хорошего, как Земля, если мы не отправимся в другую звёздную систему»

Стивен Хокинг

Хорошо сказано! Конечно, нужно продолжать космический проект. Вот главные шаги, которые человечество пройдёт в ближайшую четверть века.

Первым шагом представляется полёт человека на Марс. Этот шаг безусловно связан с созданием, а точнее с восстановлением, класса сверхтяжёлых ракет с потенциалом выше или порядка ракеты «Сатурн» (США) или «Энергия» (Россия). Многие скажут — зачем нам этот Марс? А ведь ещё в 60-е гг. Королёв создавал ракету для полета на Марс, а не на Луну. А мы знаем, что Королёв в технике не был фантазёром. Проект встал почти на 50 лет. Почему? Думаю, политики ведущих стран нашли более важные задачи. И посмотрите, — наш мир стал лучше? У нас накопился целый огромный пласт новых гораздо более серьёзных проблем. Налицо конфликт цивилизационный. На передний план вместо освоения космоса вышли проблемы терроризма, национализма и климатической катастрофы! Военные расходы США превысили все разумные пределы. Мир можно было увлечь новым великим космическим путешествием, а вместо этого волны эмиграции стали захлестывать «золотой миллиард».

Другое важнейшее открытие, которое может помочь человечеству взглянуть со стороны на себя — это открытие жизни во Вселенной. Конечно, речь идёт о примитивной биологической жизни.

Супертелескопы с диаметром в десятки метров, которые уже строят Европа и США, смогут помочь решить эту проблему. Я вас уверяю, что даже открытие в спектрах далёких экзопланет следов клеточной активности, приведёт к огромному мировоззренческому перевороту в сознании человечества. Мы поймём, что жизнь заполняет все уголки Вселенной, и её Великое Молчание станет грозным предупреждением примитивным политиканам, пытающимся погубить Землю.

Уже сейчас идут испытания космических детекторов гравитационных волн (проект LISA). После удачного детектирования гравитационных волн от сталкивающихся чёрных дыр и нейтронных звёзд наземными установками, очевидным следующим шагом становится создание космических детекторов, способных обнаружить сверхдлинные гравитационные волны, приходящие к нам из тех далеких времен, когда и времени ещё и не было. Человечество может своими глазами увидеть акт творения Вселенной — это ли не задача, достойная для человека разумного?!

Третий важнейший шаг, которому было посвящено немало страниц этой книги — тайна тёмной энергии. Наше Мироздание, Вселенная, подобно Земле, на 70 % покрытой водой, в основном состоит из загадочного океана космической энергии. Мир, в котором мы живём, контролируется антигравитацией, создаваемой океаном, на берег которого нас вывела наука буквально в последние десятилетия. Все это кончится новой революцией в физике, а точнее в науках естественных.

И новые возможности, быть может, откроют такие горизонты, перед которыми наши глобальные тяжёлые проблемы покажутся мелкими и несущественными.

Однако до этого надо дожить. Человечество стоит перед грозными испытаниями. Свободный рынок и свободная конкуренция невозможны на маленькой планете Земля. Необходимо новое общее дело, и космос способен его предложить нам. Тем более что часть угроз существованию человечества могут прийти именно с неба. Одной из них являются астероидная и кометная опасность. Как ни странно, но сегодняшняя технологически развитая цивилизация становится гораздо более уязвимой, чем 200—300 лет назад. Если два столетия назад падение небольшой космической глыбы, размером с челябинский метеорит, вообще не представляло никакой угрозы цивилизации, то прямое попадание такой глыбы в атомную электростанцию приведёт уже к континентальным последствиям. Меня часто спрашивают, а какова вероятность падения нового «челябинского» астероида. Я отвечаю строго в соответствии с теорией вероятности: точно такая же, как и вероятность падения самого челябинского астероида. Огромное количество опасных производств — химических, ядерных, биологических требует совершенно нового уровня защиты Земли от космических угроз. Поэтому создание глобальной сети обнаружения, оповещения и уничтожения (если это возможно) космических угроз становится важнейшей частью космического проекта.

Вот такие перспективы, дорогой читатель. Пора браться за общее дело! *(См. вклейку 34)*

Научно-популярная литература

1. И. С. Шкловский, Земля и Вселенная, 1985, № 3, с. 76.

2. И. С. Шкловский, Вопросы философии, 1976, No 9.

3. В. М. Липунов, В мире двойных звезд, М. Наука, 1986, Бибилотечка «Квант», Вып. 52; Переиздание, «URSS», 2008 г.

4. В. М. Липунов, О вероятности контакта с технологической цивилизацией земного типа, Астрон. Ж., 1988, т. 65, с. 433.

5. Вл. Хлумов, Кулповский меморандум, Земля и Вселенная, 1987, № 1, с. 95.

6. В. М. Липунов, Военная тайна астрофизики, Соросовский образовательный журнал, № 5, стр. 83, 1998.

7. В. М. Липунов, Искусственная Вселенная, Соросовский образовательный журнал, №6, стр. 82. 1998.

8. В. М. Липунов, Лауреаты Нобелевской премии 2017 года по физике, «Природа» №1, 2018 (http://www.pereplet.ru/lipunov/445.html#445).

9. В. М. Липунов, Физические явления на небесах, Русский переплёт, (http://www.pereplet.ru/lipunov/)

10. В. Ф. Шварцман, «Проблема поиска жизни во Вселенной», М. Наука, 1986, с. 230.

11. К. Э. Циолковский, Монизм Вселенной, в сб. Грёзы о Земле и Небе, Тула. Приокское Книжное Издательство, 1986 г., с. 276 и с. 419 (А. Л. Чижевский, «Теория Космических Эр»).

12. А. Эйнштейн, Собрание научных трудов, Наука. Москва, 1967, т. 4, с. 567.

13. В. М. Липунов, Научно открываемый Бог, Земля и Вселенная, № 1, 37, 1995.

14. Глинер Э. Б. *УФН* 172 221 (2002); Gliner E. B. *Phys. Usp.* 45 213 (2002).

15. А. Д. Долгов. Космология и элементарные частицы, и небесные тайны. В серии «Физика элементарных частиц и атомного ядра», т. 43, выпуск 3, 2012 (http://www1.jinr.ru/Pepan/2012-v43/v-43–3/01_dol.pdf).

16. А. Старобинский, Наука и религия — соперники или союзники?, «Русский переплёт», 22.III.2001. (http://www.pereplet.ru/text/starobinskiy.html).

17. А. Тутуков, Звезды — планеты — жизнь — цивилизация, Русский переплёт, 12.II.2004 (http://www.pereplet.ru/text/tutukov12feb04.html).

18. Ю. Ефремов Пределы научного знания Русский переплёт, 27.XI.2003 (http://www.pereplet.ru/text/efremov27nov03.html).

19. А. М. Черепащук, А. Д. Чернин, Вселенная, жизнь, черные дыры.

20. И. Гуревич, О познаваемости сложных систем: Познаваема ли Вселенная?, Русский переплёт, 06.VII.2004 (http://www.pereplet.ru/text/gurevich/gurevich.html).

Оглавление

Предисловие 3

Глава 1. Вселенная, которой не могло быть . 5
От печки 5
Мир, в котором мы живём 8
Время — мнимое пространство?. 13
Почему Вселенная цветная? Все дело в шляпе 23
Доплер и Физо люди разные, а эффект у них один на двоих .27
Химия Вселенной 29
Закон Хаббла и стахановское движение.... 33
Большой Взрыв или Откуда есть пошла наша Вселенная? . .37
Закон мыльного пузыря 39
Законы Кеплера 42
Ньютон. Гук. Тяготение 45
Джин выпущен из бутылки 49
Кто от кого убегает? 52
Судьба Вселенной 55
Как велика Вселенная? 62
Великая Джаз-банда 63
Царица наук или Главное управление Вселенной 67
Абсолютно чёрное тело, русская печь и термодинамическое равновесие 71
Поделим термостат пополам 76
Почему Вселенная называется горячей?. 84
Красное смещение или сколько времени на вашем термометре? 90
Фотосфера Вселенной 92
Вначале было слово. И слово звучало тяжёлым басом 96
Ландау и Лифшиц тоже разные люди 99
Вселенная и русские блины 104
Самая популярная научная формула 112
Апория велосипедиста Пети и пьяная Вселенная 115

Алхимия Вселенной 119
Вселенная как бочка мёда 125
Четыре ложки дёгтя 128

Глава II. Скрытая Вселенная 137
Тёмное вещество — скрытая материя 141
Работает ли закон Кеплера в галактиках? 146
Для чего нужна тёмная материя? 151
Семена и плевелы — открытие флуктуаций реликтового излучения 153
Невидимый мёд или была ли мобильная связь в древнем Риме? 160
Ложка дёгтя номер 2 и апория велосипедиста Пети. 162
Инфляция или одним махом четверых парадоксов смертельных убивахом. 164
Теория поля 166
Вселенная как Черёмушки или мир глазами первого дальтоника 173
Матрица Менделеева или Дорожная карта физической революции 181
Солнечная система и атом водорода. 183
Квантовая механика: глаза боятся, а руки делают 188
С Эйфелевой башни далеко видать 192
Как классическая физика получила неуд. Число N1 194
Композиция великой Джаз-банды в духе кубизма 197
Безразмерное мышление Поля Амадея Дирака 200
Пятое колесо в телеге! 203
Инфляция Гута и месть Гука! 209
Инфляция, стреляли? 215
Принцип Арнольда или кто придумал инфляцию? 223
Теория пустоты 225
Физика — это геометрия, а геометрия — физика? 233
Эрнст Мах и его полезное заблуждение 238
Космический вакуум Хойла. 242
Вселенная — как портрет Дориана Грея! 250
Стандартная свеча Вселенной. Обнаружение антигравитации. 256
Большое число номер два N2 263
Так что же открыл Хаббл? Парадокс Сэндиджа 264
Песня про тёмную энергию. Мироздание Глинера 268
Вселенная как кактус 273

Глава III. Назад в Будущее. 276
Пишем сценарий. 276
Зажглись первые звёзды нашего неба. 280
Упрямый Сэр Артур 282
Георгий Гамов приходит на помощь Эддингтону 284
Антоновские яблоки 288
Солнце не утюг. 290
Почему звёзды разные? 292
Звёзды, чайники и горящие болота 297
Ядерная эволюция 301
Нейтронные звёзды 308
Чёрные дыры. 315
Отцы и дети. 318
Двойные звёзды 321
«Эм с точкой» 323
Куда стоим или как считают звёзды? 327
Сколько планет во Вселенной?. 330

Глава 4. Великое Молчание Вселенной . . . 338
Разум как инфляционный процесс 340
Парадокс Ферми и Число N3. 343
Тупиковая ветвь 347
Посчитаем цивилизации. 349
Через сколько лет мы научимся порождать искусственные Вселенные?. 354
Простая Вселенная. 359
Миллион лет средневековья или конец Золотого века 362
Нетривиальный прогресс 364
Игра, вся жизнь — игра... 369
Парадокс Циолковского 372
Энтропия растёт как сорняк на грядке, а остаётся прекрасной незнакомкой 375
А что такое время?. 381
Великое Молчание Будущего. 387
Было ли время, когда не было времени? 395
Кто загнал Вселенную в угол? 399
А существует ли теория Всего?. 401
Наука и Религия 405
Об искусственном происхождении Вселенной. 409
Бесконечно сложный мир 410

Что делать? *(вместо заключения)*. **413**
Многомерная Вселенная!. 414
Гравитационные волны — открыты!. 422
Строить оптические супертелескопы! 442
Строить ракеты и осваивать Солнечную систему... 450
Космические перспективы 455

Научно-популярная литература 458

Научно-популярное издание

12+

Лекторий: как устроен мир

Владимир Михайлович Липунов

ОТ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА ДО ВЕЛИКОГО МОЛЧАНИЯ

Заведующая редакцией *Ю.В. Данник*
Ответственный редактор *О.М. Зубкова*
Технический редактор *Т.П. Тимошина*
Компьютерная верстка *А.Е. Кирилина*
Дизайн обложки *В.А. Воронин*

Общероссийский классификатор продукции:
ОК-034-2014 (КПЕС 2008): 58.11.1 — книги и брошюры
Подписано в печать 23.10.2018 г.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 26,9. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура BookmanOldStyle.
Тираж 2000 экз. Заказ №

Изготовитель: ООО «Издательство АСТ»
129085, РФ, г. Москва, Звездный бульвар, дом 21, строение 1, комната 705, пом. I, 7 этаж.
Электронный адрес: www.ast.ru
E-mail: ogiz@ast.ru
Изготовлено в 2018 году в Российской Федерации

«Баспа Аста» деген ООО
129085, Мәскеу қ., Звёздный бульвары, 21-үй, 1-құрылыс, 705-бөлме, I жай, 7-қабат.
Біздің электрондық мекенжайымыз: www.ast.ru
Интернет-магазин: www.book24.kz
Интернет-дүкен: www.book24.kz
Импортер в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».
Қазақстан Республикасындағы импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.
Дистрибьютор и представитель по приему претензий
на продукцию в республике Казахстан: ТОО «РДЦ-Алматы»
Қазақстан Республикасында дистрибьютор және өнім бойынша арыз-талаптарды
қабылдаушының өкілі
«РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., 3«а», литер Б, офис 1.
Тел.: 8 (727) 2 51 59 89,90,91,92; Факс: 8 (727) 251 58 12, вн. 107;
E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.
Өндірген мемлекет: Ресей Сертификация қарастырылмаған