

Этюды о Вселенной

Туллио РЕДЖЕ

Предисловие редактора перевода

Несколько слов о том, как возникла идея перевести на русский язык книгу Туллио Редже.

Редже – известный физик-теоретик, внесший большой вклад в науку о сильных взаимодействиях элементарных частиц. Достаточно сказать, что такие понятия, как «траектории Редже», «полюса Редже», давно вошли в рабочий лексикон как теоретиков, так и экспериментаторов. Так называемая «реджистика», на которой здесь неуместно останавливаться подробно, лежит в основе динамической систематики элементарных частиц.

Книга Редже, написанная на итальянском языке, попала в руки чл.-корр. АН СССР Л.Б. Окуня, которому показалась очень интересной, и он обратил мое внимание на возможную полезность перевода ее на русский язык. Я просмотрел книгу и пришел к выводу, что она действительно интересна, хотя и нестандартна по форме, так как составлена из статей, ранее опубликованных в различных неспециализированных изданиях, в том числе и в газетах.

В предисловии автора высказана интересная мысль относительно важности и необходимости для профессионального ученого заниматься популяризацией науки. Я совершенно согласен с точкой зрения Т. Редже.

После того как книга была переведена на русский язык, я прочел ее внимательно еще раз, и теперь мне хотелось бы сделать некоторые замечания. Книга несколько страдает от того, что не была с самого начала задумана как единое целое. В частности, в ней много повторений, которые редко можно встретить в научных книгах, но которые кажутся нам естественными и привычными в музыкальных произведениях и в художественной литературе (те, кто читал произведения Габриэля Гарсиа Маркеса, согласятся со мной). Впрочем, это, может быть, и не недостаток. Сколько раз, слушая хороший научно-популярный доклад по предмету, малоизвестному мне, я нередко почти тотчас забывал то, что только что слышал, и с трудом понимал дальнейшее. Так что повторение имеет свой смысл.

Уровень изложения в книге также не совсем ровный. Имеются части одновременно привлекательные и простые, но есть и места, по моему мнению, слишком трудные.

В книге нашли отражение представления теории относительности и космологии, астрофизики и физики атомного ядра и элементарных частиц, понятия сверхтекучести, сверхпроводимости и энтропии. Одна глава состоит из коротких очерков о великих ученых – Галилее, Максвелле, Эйнштейне и Геделе. Последняя глава – фантастический рассказ о том, как один «изобретатель» построил «вечный двигатель», и о психологической травме, которую пережили бы профессиональные ученые, если бы такое невозможное событие произошло. Мне эта шутивная новелла определенно понравилась.

Излишне говорить, что редактор не всегда согласен со всеми положениями книги. Так, например, говоря об изучении космического пространства, автор даже не упоминает о вкладе советской космической науки. Однако уровень советского читателя позволяет избежать особых комментариев. В книге, которая дает живую, образную картину мира, а не строго систематическое его описание, мне показалось возможным вообще свести их к минимуму. В частности, в переводе поясняются упомянутые в книге имена только тех лиц, которые не имеют отношения к науке.

Мне кажется, что книга Т. Редже будет иметь заслуженный успех и у наших читателей.

Б. Понтекорво

Предисловие автора к русскому изданию

Эти строки предисловия я пишу во время визита в Советский Союз, организованного Обществом дружбы «Италия – СССР». Трудно себе представить более удачное начало деятельности в этом обществе, чем публикация на русском языке моих «Этюд о Вселенной».

Советские ученые всегда следовали принципу доходчивости и простоты изложения, добиваясь его максимальной ясности. В СССР уже имеется много научно-популярных работ, написанных на высоком уровне, и число их непрерывно растет. Я счастлив видеть свою книгу в одном ряду с ними и доволен, что она адресована широкому кругу читателей.

За исследовательской работой, удачно дополняя ее, всегда должно следовать распространение научных знаний.

Наконец, я хотел бы напомнить о той существенной роли, которую играет научное воспитание в решении серьезнейших проблем, стоящих перед человечеством, и в первую очередь устранения угрозы миру во всем мире.

Т. Редже
Москва, июнь 1984 г.

Предисловие к итальянскому изданию

Следует признать, что в народе существует заметный интерес к научной культуре, но вместе с тем мы вынуждены констатировать полнейшую неспособность наших учебных учреждений в достаточной мере удовлетворить этот интерес.

Материалом для настоящей книги частично послужили статьи, опубликованные как в различных ежедневных изданиях, так и в специальных научных журналах, выходящих в течение 1979...1980 гг. При подготовке книги к публикации основные мысли, получившие отражение в этих статьях, были затем развиты с целью достижения единства формы и содержания.

Разумеется, я не считаю, что могу полностью удовлетворить запросы читателей, и, колеблясь, утверждаю, что нужны более ответственные и бескорыстные усилия научной общественности на пути к распространению знаний. Некоторые шаги в этом направлении у нас в Италии уже предпринимаются, при этом во многих случаях мы следуем модели англосаксов, имеющих богатейшие традиции, а то и просто переводим полностью журналы, опубликованные на английском языке, изредка добавляя выступления итальянских ученых.

Наша страна не в состоянии одна обеспечить просветительскую деятельность во всех областях знания, да и попытки охватить все в собственном доме явили бы собой пример неэффективного провинциализма. Тем не менее я вижу, что многие из моих коллег – и я имею в виду людей весьма уважаемых – избегают такой деятельности, рассматривая ее как свой последний вклад перед уходом на пенсию или как поражение, которое не надо признавать.

Сам же я решил внести свой вклад в распространение научных знаний по настоянию друзей и коллег. Мое впечатление сводится к тому, что это серьезное дело, которое требует полной отдачи, заставляет идти на нелегкие компромиссы и которое сильно отличается от исследовательской работы, хотя и сосуществует с ней, отнюдь не являясь ее простым приложением. Во всяком случае, распространение знаний – это деятельность, которая обогащает личность и расширяет горизонты, освещая новым светом известное ранее. По этой причине я взял на себя немалый риск попасть под огонь критики, согласившись на диалог также и через средства массовой информации.

Что касается будущего распространения научных знаний в Италии, я в общем являюсь оптимистом: я думаю, что в настоящее время происходит глубокая перестройка умов и интересов, сопровождаемая рождением новых принципов; результаты такой перестройки вряд ли заставят себя долго ждать. В работе над книгой мои друзья неизменно меня поддерживали, и их замечания были исключительно полезными. Особенно я хотел бы поблагодарить Джордже Понцано, который внимательно прочитал рукопись и своими исключительно полезными комментариями помог мне при ее редактировании.

Т. Редже
Март 1981 г.

Глава 1. Относительность и космология

1. Относительность: вводные замечания

Существует две теории относительности – специальная (появившаяся в 1905 г.) и общая (получившая обоснование в 1916 г.). Первая рассматривает движение тел со скоростями, сравнимыми со скоростью света (больше которой не бывает), и отправной точкой для нее служит классический подход к пространству и времени. Общая же теория относительности дополняет специальную, объясняя гравитацию на основе кривизны пространства-времени. Трудно объяснить специальную теорию относительности тому, кто совсем не имеет математической подготовки; еще труднее дается популяризация общей теории. Тем не менее математика специальной теории относительности не столь уж сложна: она не выходит за рамки действий над квадратными корнями. Встречающиеся трудности, скорее всего, психологического характера, поскольку теория относительности полностью опровергает предрассудки, основанные на житейском и потому неадекватном опыте.

В этом разделе мы поговорим об основах специальной и общей теории относительности, а в дальнейшем остановимся на некоторых конкретных вопросах.

Принцип относительности Галилея

Теория относительности Эйнштейна прежде всего занимается движением материальных тел. По определению тело, которое движется (грубым примером такого материального тела мог бы послужить поезд или самолет), занимает в различные моменты времени различные положения. Можно определить скорость и ускорение, с которыми оно перемещается. Обычно мы знаем положение поезда относительно какой-либо фиксированной точки, например станции. Если мы поменяем станцию, то изменится также и наше описание движения поезда, хотя оно будет эквивалентным старому и совершенно законным. Следовательно, существует бесконечное множество различных способов описать данное физическое явление, и они, кстати, не исчерпываются простой сменой станций. Что касается перемещений, например, внутри поезда, то пассажиры предпочитают отсчитывать расстояния от вагона-ресторана. С их точки зрения, таким образом, поезд стоит на месте, а рельсы и пейзаж движутся назад. Если бы на глаза пассажиров были надеты повязки и если бы они не могли чувствовать толчки и слышать перестук колес, то они вовсе не имели бы возможности определить, в движении находится поезд или стоит на месте. Кстати, на вокзале многим из нас приходилось, глядя из окна вагона на рядом идущий поезд, ошибочно принимать движение прибывающего поезда за отправление своего.

Еще Галилей установил (причем при отсутствии поездов), что невозможно почувствовать, находимся ли мы в состоянии покоя или в состоянии абсолютного равномерного движения, т.е. движения без толчков, остановок или виражей. Мы можем определить состояние только относительного движения двух объектов (поезда и станции, например). Так происходит потому, что законы физики одинаковы при любой скорости движения поезда; более того, мы проносимся вместе со всей Солнечной системой несколько сотен километров в секунду в космическом пространстве, даже не замечая этого. Галилею мы обязаны также теоремой сложения скоростей. Если на шоссе нам навстречу движется автомобиль и если скорость нашего автомобиля так же, как и скорость встречного, равна 150 км/ч, то наша относительная скорость равна 300 км/ч, т.е. сумме двух скоростей. Такое общепринятое представление является отражением предрассудков, о которых мы уже говорили, и его следует пересмотреть. Принимая указанную точку зрения и относительность движения, мы принимаем так называемый принцип относительности Галилея.

Опыт Майкельсона и Морли

В конце прошлого столетия двум американским физикам – Майкельсону и Морли – пришла в голову идея, развитие и проверка которой окончательно опровергли галилеевское представление о сложении скоростей. Тогда уже было известно, что скорость света чуть меньше чем 300000 км/с. (Это в миллион раз больше скорости реактивного самолета.) В те времена считалось, что свет распространяется в заполняющем все пространство эфире подобно тому, как звуковые волны распространяются в воздухе. Эфир – понятие неточное, породившее весьма большую путаницу, от описания которой мы избавим читателя. К счастью, представление об эфире как о физической реальности осталось в прошлом, и привело к этому как раз теория относительности. Идея Майкельсона и Морли заключалась в том, что свет, распространяясь в эфире, должен иметь в различных направлениях разные скорости. Так, если поднимается ветер, то звук распространяется медленнее против ветра, в то время как с попутным ветром его скорость увеличивается. Так вот, наша Земля обращается вокруг Солнца со скоростью около 30 км/с, непрерывно меняя при этом направление движения, из-за чего оба исследователя ожидали в один прекрасный момент почувствовать, как подует в лицо «эфирный ветер». Они сконструировали чувствительнейшую аппаратуру,

с помощью которой предполагали «почувствовать» этот ветер и тем самым определить скорость света. Если бы опыт Майкельсона и Морли удался, мы могли бы сказать, что тело, неподвижное относительно эфира, находится в абсолютном покое, поскольку оно не чувствует никакого ветра.

Опыт, к счастью, не удался. Майкельсон и Морли не почувствовали никакого «ветра», свет продолжал распространяться со скоростью 300000 км/с (эту скорость принято обозначать буквой c) во всех направлениях и во все времена года. Результат выглядел парадоксальным. Ведь, казалось бы, если мы движемся навстречу свету, то он должен к нам приближаться со скоростью, равной сумме нашей скорости и собственной скорости c , точно так же, как в случае встречных автомобилей на шоссе. Так что прощайте и сложение скоростей, и, чего скрывать, «здравый смысл»!

Принцип относительности Эйнштейна

Незаметный служащий Патентного бюро города Берна увидел истину там, где именитые ученые, слегка задев ее и не заметив, прошли мимо. Эйнштейн считал, что принцип относительности должен быть сохранен во что бы то ни стало и что нельзя говорить об абсолютном движении или покое даже при измерении скорости движения света. Итак, он принял постоянство скорости света за тот краеугольный камень, на котором возводится здание теории относительности. Далее следует отложить в сторону теорему сложения скоростей и воспользоваться другой формулой, которая практически совпадает с первой в случае движения со скоростью, малой по сравнению с c , но вносит существенные поправки при движении с большой скоростью. Прежде всего, если по этой новой формуле складывать какую бы то ни было скорость со скоростью света, мы всегда получим c , как и следует из опыта Майкельсона и Морли. Скорость света здесь играет такую же роль, какую до Эйнштейна играла бесконечно большая скорость. Если вместо двух автомобилей мы возьмем два космических корабля, движущихся навстречу друг другу со скоростями 150000 км/с, то их относительная скорость будет уже не 300000 км/с, а всего лишь 240000 км/с, и, во всяком случае, она всегда будет меньше, чем c – световой барьер непреодолим. В случае движения автомобилей поправка до смешного мала (одна миллиардная часть миллиметра за секунду), и поэтому никто никогда ее не замечал.

Нельзя, однако, отбрасывать привычное правило сложения скоростей, не подвергая всего остального серьезному пересмотру, последствия которого, мягко говоря, могут привести в замешательство. Достаточно следующего примера. Представим самолет, который вылетел из Турина в Рим; на полпути с его борта послан в пространство радиосигнал, который, как известно, так же, как и свет, представляет собой электромагнитную волну и распространяется во всех направлениях с такой же скоростью. Человеку на земле покажется, что сигнал, пройдя в противоположных направлениях одинаковые пути, одновременно достигнет (спустя тысячную долю секунды) как Турина, так и Рима. Иное мнение будет у пилотов. С их точки зрения сигнал, как и прежде, движется со скоростью 300000 км/с, но Рим теперь «движется навстречу» ему, в то время как Турин «удаляется». Поэтому сигнал сначала придет в Рим, а потом уже достигнет Турина. Чье восприятие правильное: пилотов или человека на земле? По Эйнштейну и в соответствии с результатами выдающихся экспериментов, выполненных в течение последних семидесяти лет, правы все: два события, которые одному наблюдателю покажутся одновременными, не будут таковыми с точки зрения другого наблюдателя. В рассмотренном примере разница минимальна (всего две миллиардные доли секунды), но она может стать весьма значительной в лаборатории, когда выполняются эксперименты, например, с элементарными частицами. Время, таким образом, не является абсолютным, как утверждали Ньютон и Кант, да и течет оно не одинаково для всех наблюдателей.

Кажущиеся парадоксы

Принцип относительности Эйнштейна ставит абсолютный предел скорости. Невозможно заставить двигаться тело или послать сигнал со скоростью, большей скорости света. Теория затрудняет жизнь тех, кто пытается достичь этой скорости, и подвергает их наказаниям, которые становятся все более суровыми, принимая форму остроумных (хотя и кажущихся) парадоксов. Если, находясь на земле, мы будем наблюдать маятник, который качается на борту самолета (допустим, что это возможно), то в каждый момент времени мы можем определить скорость маятника, складывая скорость самолета и скорость маятника относительно самолета. Если опираться на здравый смысл (т.е. на представление Галилея), то мы должны были бы увидеть удаляющийся маятник, который совершает колебания все с той же частотой, с которой он колебался бы на земле. Однако принцип относительности Эйнштейна утверждает, что при соединении колебательного движения маятника и поступательного движения самолета скорость маятника в каждый момент времени окажется меньше, чем можно было бы ожидать. Наказание становится все сильнее по мере приближения к скорости света. По этой причине, когда будут выполнены расчеты, окажется, что маятник колеблется медленнее и отмеряет более длинные секунды, если он находится на борту самолета.

Все, что мы говорили по поводу маятника, вполне справедливо для любой системы, движущейся внутри самолета. Эффект изменения времени смехотворно мал – всего одна секунда за сто тысяч лет, но тем не менее его заметят современные атомные часы, и, кроме того, он представляет интерес с принципиальной точки зрения. На эту тему в свое время была развернута горячая дискуссия, и в пылу страстей произносились обвинительные речи против теории относительности, которые сегодня воскрешают в памяти процесс клерикалов против Галилея.

Читатель может возразить, что ситуация симметрична, и, следовательно, пилоты должны тоже заметить замедление явлений, происходящих на земле. Так что же происходит во время путешествия? Каждый принадлежащий к одной из двух групп (пилоты или наземные службы) должен был бы ожидать отставания часов своих товарищей из другой группы, что, очевидно, не может быть справедливо для всех. Мы могли бы (и, кстати, это было проделано) поднять в воздух атомные часы и по возвращении самолета сравнить время, которое покажут летавшие часы, с тем, которое показывают точно такие же часы, оставшиеся на земле. Опыт говорит, что отстают всегда те часы, которые проделали путешествие. Так что же нам теперь делать с принципом относительности: как-то переделать его или вообще выбросить за борт, как предлагают некоторые его слишком рьяные противники? Ни то ни другое! Расчеты отставания бортовых часов с точки зрения земного наблюдателя справедливы до тех пор, пока самолет движется равномерно (т.е. по прямой и без торможения), но должны быть исправлены, если, как происходит в действительности, он должен совершить вираж, чтобы вернуться в Турин. Как раз во время виража отставание часов увеличится еще больше, нарушится симметрия, о которой шла речь, и исчезнет кажущийся парадокс.

Раз с точки зрения пилотов путешествие продлится меньше времени, то и пройденный путь должен им показаться короче, если они будут лететь все время с постоянной скоростью. (Не надо пугаться, потому что расстояние изменится всего лишь на одну тысячную долю миллиметра, если весь путь равен тысяче километров.) Для космического корабля будущего, который отправится в полет к ближайшей к нам звезде Альфа созвездия Центавра (называемой Альфой Центавра), расположенной на расстоянии около четырех световых лет (40000 млрд. км; один световой год равен расстоянию, которое свет проходит в течение одного года), со скоростью, равной $4/5$ скорости света (240000 км/с), эффект уже будет весьма ощутим. Земляне будут считать, что весь путь туда и обратно проделан за десять лет, тогда как часы космонавтов покажут всего шесть лет. Для космонавтов расстояние до Альфы уменьшится до 2,4 светового года. Если бы этот путь проделал один из близнецов, то он вернулся бы домой на четыре года моложе своего брата, оставшегося на Земле.

Эквивалентность массы и энергии

Так что же произойдет, если мы на самом деле попытаемся ускорить материальное тело до скоростей, близких к скорости света? Чтобы так поступить, нам придется сообщить телу энергию, и при этом мы столкнемся с удивительным явлением. Теория относительности утверждает эквивалентность массы и энергии в соответствии с теперь уже знаменитой формулой: $E = mc^2$ (которую словами можно выразить так: «Энергия равна массе, умноженной на квадрат скорости света»). Если мы проделаем расчеты, то увидим, что один грамм массы вещества соответствует огромной энергии, а именно свыше 25 млн. кВтч. Вначале увеличение энергии тела сопровождается едва уловимым увеличением массы и, следовательно, инерции тела. Поэтому становится чуть-чуть труднее ускорить его дальше. По мере приближения скорости к величине с этот эффект, становясь все внушительнее, делает невозможным преодоление скорости света.

Появившаяся на свет для спасения теории относительности от указанного да и от других противоречий формула $E = mc^2$ получила блестящее подтверждение, когда было открыто деление урана U235, при котором одна тысячная часть полной массы исчезает, чтобы вновь целиком обнаружиться в виде атомной энергии. Даже в обычных химических реакциях соблюдается соотношение $E = mc^2$, но количества вещества, появляющиеся или исчезающие во время реакции, меньше одной десятиллиардной части всей массы, и обнаружить их невозможно даже с помощью очень точных весов.

Важно подчеркнуть, что в специальной теории относительности рассматривается равномерное движение, т.е. движение с постоянной скоростью, при котором не изменяется направление движения. Если движение происходит с ускорением, обусловленным внешними силами, например гравитационным притяжением, то специальную теорию относительности уже нельзя применять. Упомянутый выше парадокс близнецов, к рассмотрению которого мы ниже вернемся, возник именно из-за попытки использовать специальную теорию относительности применительно к двум системам, одна из которых движется ускоренно относительно другой.

Принцип эквивалентности

В общей теории относительности законы физики выражаются одинаково в любой системе отсчета; в ней, следовательно, рассматриваются также тела, движущиеся ускоренно относительно друг друга. Эйнштейн исходил из хорошо известного эмпирического факта – из результатов знаменитого (хотя, может быть, никогда и не проведенного) эксперимента Галилея, в котором два тяжелых тела с разными массами, сброшенные с Пизанской башни, достигали земли одновременно. Существуют два способа определения массы тела. Первый способ (инерциальный) заключается в измерении ускорения, сообщаемого телу известной силой; при втором (гравитационном) измеряется притяжение тела к какой-нибудь близко расположенной массе (если в качестве такой массы служит Земля, то измеряется, следовательно, вес тела). Уже Ньютон находил весьма странным, что оба способа определения массы дают одинаковые результаты в пределах ошибок эксперимента; что так и должно быть, по существу, следует из опыта Галилея. Эйнштейн возвел этот таинственный эмпирический факт в ранг конструктивного принципа – принципа эквивалентности.

Известность получил его мысленный эксперимент (*Gedanken experiment*), в котором ученый рассматривает лабораторию, помещенную в закрытой кабине лифта, в двух совершенно различных ситуациях. В первом случае кабина лифта подвешена неподвижно в гравитационном поле Земли, и наблюдатель, присутствующий в ней, видит, что предметы падают с привычным ускорением свободного падения. Во втором случае кабина лифта находится в космосе, далеко от каких-либо масс, но при этом ракетный двигатель сообщает ей ускорение, в точности равное ускорению свободного падения, и наблюдатель этого не ощущает. Эйнштейн привлек внимание к тому, что если справедлив принцип эквивалентности, то совершенно невозможно отличить падение тел под действием силы тяжести от падения под действием инерции. Таким образом, гравитация и инерция в некотором смысле приводят к одинаковым эффектам.

Кривизна пространства

Взяв за отправную точку принцип эквивалентности и пройдя сквозь головокружительную серию мысленных экстраполяций, ведомый безошибочным эстетическим чутьем, Эйнштейн пришел к понятию кривизны пространства. Чтобы как-то осознать связь гравитации с кривизной, представим себе стол с резиновой поверхностью вместо привычной твердой. Бильярдный шар, положенный на этот стол, образует углубление. Материальное тело вызывает деформацию такого же рода в окружающем пространстве. Если положить на стол два шара, то каждый из них стремится попасть в углубление, образованное другим. Возникающая в этом случае сила «притяжения» полностью аналогична силе гравитации. Все же деформация пространства, вызванная даже таким гигантским телом, как Солнце, едва заметна. Кроме объяснения гравитации теория Эйнштейна предсказывает различные тонкие эффекты, а также объясняет аномалию в движении планеты Меркурий, в свое время заставившую исследователей придумать новую планету – Вулкан, которую, однако, никто не наблюдал.

Что еще более важно, теория относительности предсказывает точно такое же поведение света в гравитационном поле, как и поведение тел под действием силы тяжести. Это предсказание, подтвержденное в 1919 г. во время солнечного затмения, сделало Эйнштейна известным и широкой публике. Итак, направленные вверх световые волны, так же, как и камень, брошенный вверх, должны терять энергию движения. В то же время свет по своей природе вынужден, как всегда, распространяться со скоростью 300000 км/с и не может замедляться. Свет, оказывается, теряет энергию, уменьшая свою частоту и увеличивая тем самым длину волны. В результате такого эффекта цвета радуги совсем незаметно смещены в сторону красного. Даже длина волны радиосигнала, направленного в космическое пространство с Земли, увеличится на одну миллиардную часть. Поэтому внешнему наблюдателю будет казаться, что токи в антенне, излучающей радиоволны, колеблются медленнее, чем на самом деле, хотя и очень ненамного, т.е. что на поверхности Земли время течет медленнее, чем во внешнем пространстве. Разница составляет всего лишь около одной секунды в пятьдесят лет, но современные атомные часы способны заметить ее. В Электротехническом институте им. Галилео Феррариса в Турине первый такой эксперимент позволил измерить эту величину для разности высот между Плато Роза и Туринном. Потеря во времени хоть и мала, но приводит к серьезным техническим последствиям, и современная навигационная сеть, использующая спутники связи, должна учитывать этот эффект. На поверхности Солнца эффект замедления времени в тысячу раз больше, а на нейтронных звездах, плотность вещества которых такова, что масса, равная массе Солнца, занимает область с размерами, сравнимыми с размерами города, указанный эффект достигает 10%. В черной дыре, наконец, мы доходим до 100%, и, следовательно, на поверхности черной дыры течение времени вовсе прекращается. Гравитационное поле здесь настолько сильно, что не выпускает свет наружу. Список парадоксальных явлений можно было бы продолжить.

Развитие общей теории относительности

Естественной лабораторией для проверки общей теории относительности служит все космическое пространство: собранные вместе массы миллиардов галактик вызывают искривление пространства в глобальном масштабе. По этой причине самые значительные успехи теории достигнуты при обращении на современной основе к наиболее глубинным космологическим периодам времени. Модель «большого взрыва» (the big bang), согласно которой рождение Вселенной произошло примерно 20 млрд. лет назад при гигантском взрыве (см. стр. 49), представляет собой наиболее замечательный результат такого развития теории.

В последние годы своей жизни Эйнштейн интенсивно работал над проблемой объединения теорий гравитации и электромагнитных явлений в некую «сверхтеорию». Эти его попытки не увенчались успехом, равным образом как и усилия многих других, жаждавших опередить великого мастера в достижении цели.

В некотором смысле Эйнштейн оказался жертвой той лавины, которую он сам привел в движение. Перед его смертью уже существовал целый калейдоскоп ускорительных установок; происходили открытия все новых элементарных частиц, но никто еще не мог предугадать те сложные законы симметрии, которым они подчиняются. С другой стороны, Эйнштейн не имел привычки внимательно следить за эмпирическими данными. Его три основополагающие работы 1905 г. были порождены скорее соображениями эстетического характера: речь шла о том, чтобы путем утверждения новых фундаментальных принципов исключить кажущуюся асимметрию в прежних законах. Специальная теория относительности все же родилась, хотя Эйнштейн при этом не ссылался на опыт Майкельсона и Морли; теория броуновского движения увидела свет, несмотря на то что ее автор был знаком только поверхностно с работой Броуна, выполненной за сто лет до этого.

По этой причине, в частности, Эйнштейн останется в нашей памяти как человек уникальный и неповторимый. Он не оставил после себя выдающихся учеников, как в отличие от него сделали Ферми, Эренфест, Зоммерфельд и другие великие ученые. Поэтому будущая единая теория поля хотя и получит в наследство от Эйнштейна общий идейный импульс и философскую постановку проблемы, но будет отличаться своими характерными техническими деталями и конкретной практической реализацией. В настоящее время уже предприняты определенные усилия для синтеза такой теории и работа в этом направлении продолжается. Следующее десятилетие, возможно, окажется для физики решающим.

2. Парадокс близнецов

Будет поучительно проанализировать теперь более детально кажущийся парадокс часов (или близнецов), о котором мы уже упоминали. Он долгие годы служил любимым коньком антирелятивистов. Результаты сегодняшних экспериментов неопровержимо свидетельствуют о справедливости специальной теории относительности, и парадокс близнецов поэтому сохраняет немаловажное педагогическое значение.

Парадокс основан на явлении растяжения времени. Движущиеся относительно нас часы покажут замедленное время в соответствии с формулой, связывающей время и скорость их движения. При приближении к скорости света часы будут практически казаться остановившимися. Под часами мы понимаем не только будильник, стоящий на столе, но в общем случае любую физическую систему, которая совершает повторяющиеся движения. Если бы мы могли наблюдать за астронавтами в космическом корабле, удаляющемся от нас со скоростью 240000 км/с (4/5 скорости света), то мы бы увидели, что их движения замедленны: чтобы продвинуть стрелку на три минуты, их часам потребовалось бы пять наших минут.

Можно представить себе короткий научно-фантастический рассказ об истории, происшедшей с братьями-близнецами Тимом и Томом. Тим отправился к Альфе Центавра, а Том оставался на Земле. Расстояние до Альфы Центавра выражается круглой цифрой в 4 световых года. При скорости 240000 км/с на путешествие туда, как показалось Тому, потребовалось точно пять лет, и еще пять лет ушло на обратный путь; Тиму же показалось, что на весь путь ушло всего шесть лет: действительно, часам Тима потребовалось пять часов времени Тома, чтобы продвинуться всего на три. В результате, вернувшись домой, Тим оказался на четыре года моложе, чем его брат.

Путаница возникает тотчас, когда близнецы меняются ролями; в самом деле, столь же справедливо утверждение, что Том с точки зрения Тима удаляется и что его часы покажутся Тиму отставшими ровно на столько же. Следовательно, Тим по возвращении вроде бы должен увидеть более молодого Тома. Поскольку подобный эксперимент в принципе может быть выполнен, ясно, что из двух ответов только один может быть верен (или, как утверждают некоторые недоброжелатели, ни тот ни другой), и наши рассуждения ошибочны.

Ошибка действительно имеется, но ее трудно выявить. Дело в том, что возраст братьев надо сравнивать в один и тот же момент времени, но в теории относительности отсутствует универсальное понятие одновременности. Два события, которые происходят одновременно с точки зрения Тома, вовсе не

кажутся одновременными Тиму, и наоборот. При малых скоростях, к которым мы привыкли, этот эффект также имеет место, но мы его не замечаем. Представим себе на железнодорожной станции два светильника, расстояние между которыми один километр, и пусть они зажигаются одновременно. Для пассажиров поезда, прибывающего на станцию, эти два события не синхронны, но они разделены во времени всего на несколько триллионных долей секунды. Эффект едва увеличивается при увеличении скорости поезда и расстояния между светильниками. Оцененный же применительно к астронавту Тиму, он становится весьма существенным и должен быть принят во внимание.

Но вот прошло пять лет от начала путешествия, и Том заявил: «Мой брат только что достиг Альфы, и сейчас в его путешествии произойдет «решительный поворот»; ему же кажется, что прошло только три года». Том был прав.

Тим же по прибытии на Альфу высказался иначе: «Для меня прошло три года, а моему брату кажется, что прошло всего три пятых этого срока, т.е. немного меньше двух лет». И Тим также был прав.

Ключ к разгадке парадокса кроется в выражении «в один и тот же момент времени», которое больше не имеет универсального значения. Для Тома событие «прибытие Тима на Альфу» и момент времени, отстоящий от начала путешествия на пять лет, одновременны. Для Тима же момент прибытия на Альфу совпадает с более ранним моментом времени Тома, наступившим всего лишь спустя девять пятых года.

От скорости удаления космического корабля зависит, какой именно момент времени Тома является синхронным с заданным моментом времени Тима. Если движение корабля замедлится, то произойдет смещение вперед синхронного момента времени Тома. Когда же корабль повернет, чтобы отправиться в обратный путь, это смещение увеличится, пока к концу путешествия оно опять не достигнет девяти пятых года. «Решительный» поворот космического корабля с Тимом на борту прибавляет годы к возрасту Тома и приводит к его стремительному старению. Сам же Том не изменял направления своего движения, и поэтому Тим остался молодым. Взаимоотношения между близнецами не являются больше симметричными, так как один из них вынужден был тормозить и разгоняться; рассматриваемая система не является «инерциальной», и специальная теория относительности к ней неприменима. Таким образом, подлинного парадокса не существует.

Наш пример ясно демонстрирует пределы применимости специальной теории относительности: попытки описать с ее помощью относительные движения, не являющиеся равномерными, обязательно приводят к противоречиям.

Во многих научно-фантастических произведениях неоднозначность течения времени представляется в драматических тонах с помощью выдуманных сеансов радио- или телепатической связи. Посмотрим, в чем заключаются беды обоих подходов.

Пусть для разговора используются радиоволны. Отправленные с Земли, они достигают космического корабля с опозданием, которое растет с увеличением пройденного расстояния. Из-за такого растяжения времени, или из-за задержки сигнала, разговор будет казаться замедленным. Сигнал окажется «растянутым» в три раза. Сигналы, отправленные с Земли в течение первого года с момента начала путешествия, будут прибывать на корабль в течение трех лет, что соответствует времени путешествия до Альфы. Если корабль повернуть назад, то растяжение сигнала превратится в сжатие, и все три года обратного пути на корабле будут собираться передачи последующих девяти земных лет. Если сообщения посылает Тим, то Земле потребуется девять лет для принятия сигналов, посланных с корабля на пути к Альфе, и всего один год для принятия сигналов с обратного пути.

Передача сообщений по радио становится бессмысленной: сообщение, посланное Томом спустя четыре месяца после начала путешествия, достигнет Тима, когда тот уже проведет в полете целый год. Тим ответит незамедлительно, но ответ придет на Землю через три года после отправления. Так что в распоряжении Тома будет достаточно времени для размышлений и для того, чтобы поесть спагетти.

Чтобы обойти медлительность радиоволн, писатели-фантасты призвали на помощь телепатию. Мыслям же положено иметь бесконечную скорость. Поэтому сигналы, поданные Томом, доходят до Тима «мгновенно». Допустим для примера, что по прошествии пяти лет Том решил выяснить у Тима, действительно ли тот прибыл на Альфу. Тим отвечает положительно, используя ту же систему связи, и его ответ достигает Тома тоже «мгновенно». Но беда состоит в том, что тогда Том получит ответ раньше, чем отправит запрос, а именно через девять пятых года после начала путешествия. Мы здесь столкнулись с весьма неприятной ситуацией, которая возникает всякий раз, когда сигнал как будто имеет скорость, превышающую скорость света. Но эту скорость превысить никак нельзя – она остается непреодолимой стеной и источником плохого настроения тех писателей-фантастов, которые обращаются к гиперпространству, к разным проколам в пространстве, черным дырам, преобразователям материи и ко всякой другой чертовщине, чтобы хоть как-то обойти неудобное постоянство скорости света. Среди различных уловок они прибегают и к помощи спасительных тахионов – частиц, летящих якобы быстрее света.

Никто никогда не видел ни одного тахиона; если и можно родиться тахионом, то стать им нельзя. Но даже если бы тахионы и обнаружили, пользы от этого было бы мало. Стена скорости света непреодолима

также и с обратной стороны, и поэтому тахион не смог бы замедлиться и остановиться. Что еще хуже, нельзя было бы различить момент прихода и время отправления тахиона способом, не зависящим от наблюдателя. Если бы Том выстреливал тахионы из ружья, как в приключенческом фильме «Звездные войны», то вполне могло бы оказаться, что Тим видел, как тахионы проносятся в обратную сторону и стремительно влетают в дуло ружья. Добавим ко всему этому немислимые усложнения математического аппарата теории, и станет понятно, почему идея тахионов не имела успеха.

Тем не менее трудно представить себе, чтобы художественный вымысел обошелся без чего-нибудь сверхсветового (т.е. перемещающегося со скоростью, большей скорости света), и, в сущности, колоссы типа тех, что показаны в «Звездных войнах», так же занимательны, как и привычные уже «космические дилижансы», проносящиеся со скоростью около 10 световых лет в час.

3. Свет и гравитация

Принцип эквивалентности

Все слышали о знаменитом эксперименте Галилея, в котором он сбросил с Пизанской башни два камня с различными массами. Камни упали на землю через одинаковое время, тем самым опровергнув привычные, но ошибочные предсказания Аристотеля. Многие считают, правда, что речь идет о легенде, не имеющей под собой исторической почвы; однако, как бы то ни было, факт остается фактом и служит основой принципа эквивалентности, на котором Эйнштейн воздвиг здание общей теории относительности. Чтобы пояснить этот принцип, остановимся сначала на понятии массы. Если мы приложим к телу постоянную силу F , то оно начнет перемещаться с ускорением a (в соответствии со знаменитой формулой $F = ma$), которое тем слабее, чем больше масса тела m . Масса, таким образом, служит мерой инерции тела.

Закон всемирного тяготения Ньютона допускает и другое определение массы: два тела притягиваются с силой, пропорциональной их массам и обратно пропорциональной расстоянию между ними. Измеряя притяжение между двумя телами, мы можем определить их массы. Хотя это и не кажется очевидным, но на самом деле мы ежедневно с помощью весов измеряем силу притяжения между килограммом хлеба и нашей Землей.

По счастливому стечению обстоятельств оба определения массы совпадают точно или во всяком случае в пределах чрезвычайно малых экспериментальных ошибок. По этой причине вес (т.е. сила притяжения к Земле) какого-либо груза в точности пропорционален его инертной массе, а ускорение свободного падения не зависит от массы. Этот результат эквивалентен результату эксперимента Галилея. Он и воодушевил Эйнштейна на проведение любопытного мысленного эксперимента с лифтом.

Говоря о лифте, мы, конечно, имеем в виду идеальную лабораторию, помещенную в специально сконструированном ящике, исключающем всякое общение с внешним миром. Итак, вначале лифт подвешен где-то на Земле. Наблюдатель внутри его замечает, что все предметы падают с ускорением свободного падения (одинаковым для всех тел). Затем лифт мысленно переносится в космическое пространство, далеко от каких-либо других объектов, где ракетный двигатель сообщает ему ускорение, в точности равное ускорению свободного падения. Физик внутри лифта снова видит, что все предметы перемещаются с ускорением (отдачи), но, как мы уже знаем, он не имеет никакой возможности различить эти две ситуации, т.е. отличить гравитационную массу от инертной.

Точно так же невозможно, находясь внутри лифта, сказать, падает ли он свободно или просто парит неподвижно в пространстве. В обоих случаях наблюдается полное отсутствие веса. Таким образом, при внимательном рассмотрении оказывается, что проявления тяготения и инерции неразличимы, во всяком случае в пределах кабины лифта и ограниченного интервала времени. Указанная неразличимость известна под названием «принципа эквивалентности».

Искривление луча света гравитационным полем

Мы не можем, разумеется, входить здесь в детали математического аппарата, который позволяет лаконично, хотя и непонятно для большинства читателей выразить этот принцип. Но мы можем задаться вопросом: какое все это имеет отношение к свету?

На первый взгляд свет представляет собой такую форму материи, которая полностью игнорирует существование гравитационного поля (тяготения). Но если бы это действительно было так, то мы могли бы отличить первую ситуацию в эксперименте с лифтом от второй (и по этой же причине третью от четвертой). В самом деле, если бы свет не «падал» в поле тяжести, то в неподвижном лифте он двигался бы по прямой линии; во втором случае ускоренное движение кабины лифта совместно с собственным движением света хотя и незначительно, но все же изменило бы траекторию света и придало ей вид параболы. Чтобы спасти принцип эквивалентности и иметь возможность применять его в любых условиях, приходится допустить, что поле тяготения действует и на свет, хотя и немного. Этот эффект был

неоднократно подтвержден наблюдениями, проведенными во время затмений Солнца, когда можно было проследить траекторию луча света от звезды в непосредственной близости от поверхности Солнца. Для подтверждения «падения» радиоволн использовался и такой космический объект, как квазар (буквально «почти звездный объект») 3C273.

Но пойдем дальше. Так же как камень, брошенный вверх, теряет энергию движения (кинетическую), замедляясь при этом, свет, казалось бы, тоже должен «замедляться». Свет, однако, вынужден всегда двигаться со скоростью c (300000 км/с) и может терять энергию, только уменьшая частоту. Частота светового луча, оставляющего поверхность Земли, меняется меньше чем на одну миллиардную часть; при отпавлении с Солнца эффект примерно в тысячу раз сильнее.

Тем не менее малость этого эффекта не должна приводить к недооценке громадного философского значения рассмотренного явления.

Гравитация влияет на течение времени

Свет – это волновой процесс, т.е. такой процесс, который повторяется через регулярные интервалы времени. В этом смысле свет представляет собой «часы», которые отбивают удары, преданно следуя ритму источника; частота света равна частоте колебаний излучающего его атома (кстати, современные атомные часы используются именно в качестве источников точного времени). Если внешнему наблюдателю кажется, что на Земле «световые часы» идут медленнее, то во избежание противоречий все земные процессы должны казаться ему протекающими во столько же раз медленнее.

Итак, время течет быстрее в космическом пространстве, чем на поверхности Земли. А на Земле оно течет быстрее на горных вершинах, чем в долинах. Впервые подтверждение этого удивительного явления (с помощью часов) было получено в Турине в Электротехническом институте им. Галилео Феррариса, где мой друг Лещутта использовал в своей работе целую коллекцию точнейших атомных часов, как раз тех, по которым сверяют точное время. Вместе с сотрудниками Лаборатории космогеофизики Национального совета исследований им было проведено сравнение двух идентичных часов, причем одни часы находились в Турине, а другие высоко в горах на Плато Роза; в результате выяснилось, что вторые часы уходили вперед на 30 наносекунд в день (одна наносекунда равна одной миллиардной части секунды). Этот едва заметный эффект породил целую серию остроумных шуток. На самом же деле речь здесь идет о весьма серьезных вещах: подобные эксперименты были поставлены в Мэрилендском университете и Токийской астрономической обсерватории, и полученные результаты оказались в полнейшем согласии с эйнштейновской теорией относительности.

В скором времени вступит в строй навигационная система, использующая спутники связи; в этой системе будет целое созвездие из 24 спутников с атомными часами (водородных мазеров), которые, находясь на орбите, будут передавать по радио свои сигналы во все концы Земли. Местонахождение любого корабля можно будет определять по относительным задержкам принятых сигналов с ошибкой, не превышающей пяти метров. Такая точность может быть достигнута, только если учитывать возникающее согласно принципу относительности различие в течение времени на орбите и на Земле. А для сицилийских рыбаков, например, ежедневно подвергающих себя риску при ловле рыбы вблизи территориальных вод Туниса, пять метров имеют очень большое значение.

Теория относительности уже не является заумной, отвлеченной теорией – она начинает влиять на нашу жизнь посредством неожиданных технических новинок. Как мы говорили, замедление времени на Солнце намного больше, чем на Земле. Это уже давно доказано с помощью спектроскопии. Существуют звезды, на которых эффект еще значительнее: так, например, Сириус на самом деле – это система из двух звезд, Сириуса А и Сириуса В; Сириус В представляет собой так называемый «белый карлик», плотность которого такова, что масса, равная массе Солнца, занимает там объем, равный объему Земли. Относительная задержка времени на этой звезде достигает одной десятитысячной, т.е. приблизительно восьми секунд в сутки.

Пульсар, обнаруженный внутри Крабовидной туманности (M1 по каталогу Мессье, или NGC 1952;) и являющийся остатком взрыва сверхновой около девяти столетий назад, представляет собой следующую стадию еще большего сжатия звездного вещества, а именно «нейтронную звезду», плотность массы которой достигает десяти миллионов тонн на кубический сантиметр. По современным представлениям она имеет форму почти правильной сферы диаметром порядка 20 км, что сравнимо с размерами, например, города Турина. Задержка времени на ее поверхности по сравнению с внешним пространством достигает 10%, а вторая космическая скорость (скорость, которую необходимо преодолеть для преодоления силы притяжения) достигает 100000 км/с.

В черной дыре

Но даже плотность пульсара не предел. Имеются весьма веские причины, чтобы признать существование так называемых «черных дыр», где гравитация наконец побеждает все прочие силы и приводит звезду в состояние коллапса (катастрофического сжатия).

В черной дыре вторая космическая скорость достигает скорости света, т.е. 300000 км/с; при этом преодолеть силу притяжения не может ни один объект, включая свет. Задержка времени здесь доходит до 100%; хотя это звучит парадоксально, но на поверхности черной дыры течение времени останавливается. Окончательный коллапс должен был бы наступить менее чем за одну тысячную секунды, но этот короткий интервал времени растягивается гравитационными эффектами в вечность.

Если бы отважные (и безрассудные) исследователи осмелились войти в черную дыру на космическом корабле, то в таком случае растяжение времени возымело бы обратное действие. Астронавты увидели бы, что события во внешнем пространстве стали разворачиваться с внезапным ускорением, и в считанные доли секунды субъективного времени астронавтов они вместе со своей черной дырой оказались бы в самом отдаленном будущем нашей Вселенной. Так что путешествие в черную дыру – это одновременно и путешествие в будущее.

Но что же увидел бы астронавт, достигнув «конца времен»? Ответ очень сложен и зависит от грядущей судьбы Вселенной; мы даже не знаем, будет ли она и в дальнейшем расширяться, или же галактики снова соберутся вместе через миллиарды лет, как утверждают некоторые. Во всяком случае, что бы ни увидел астронавт, он никогда не смог бы сообщить нам об этом, поскольку радиоволны не могут отойти от коллапсирующей звезды. Скорее всего, в течение доли секунды он был бы раздавлен чудовищными силами тяготения, существующими внутри черной дыры.

4. Черные дыры

Специалисты не перестают удивляться всеобщему интересу к черным дырам. Лично я хоть и нахожу черные дыры достойными внимания, но не считаю их ни единственными, ни наиболее важными объектами из встречающихся в широкой панораме современной астрофизики. Почти наверняка интерес широкой публики рождается подсознательно, следуя механизмам, по поводу которых могли бы дать волю своей фантазии психологи.

Предвидение Лапласа

Итак, поговорим подробнее о черных дырах. Уже маркиз де Лаплас – величайший математик – заметил, что вторая космическая скорость на планете или звезде диаметром в несколько сотен миллионов километров должна была бы превышать скорость света, и сделал правильный вывод, что такой объект должен быть невидимым, так как он удерживает лучи света. Открытие общего принципа относительности видоизменило выводы Лапласа, появились и научно-фантастические предсказания насчет течения времени внутри черной дыры, о чем мы уже говорили.

Напомним читателям, что вторая космическая скорость – это минимальная скорость, которую необходимо сообщить снаряду для окончательного преодоления силы притяжения небесного тела. Эта скорость, равная 11 км/с на Земле, достигает около 600 км/с на Солнце и всего лишь 20 км/ч (5,5 м/с) на Фобосе – одной из «лун» Марса. Таким образом, чемпиону Московской олимпиады Меннеа не представляло бы никакого труда оторваться от Фобоса и стать его спутником. Космическая скорость зависит от массы и размеров небесного тела: чем меньше размеры его при той же массе, тем больше скорость. Существуют такие звезды-карлики, где масса, равная массе Солнца, занимает объем, равный объему Земли; для них космическая скорость может достигать 10000 км/с. Для нейтронных звезд, имеющих размеры, сравнимые с размерами города Турина, она доходит до 100000 км/с, т.е. равна примерно одной трети скорости света.

На нейтронной звезде чайной ложкой можно было бы зачерпнуть столько вещества, сколько содержится в целой горе на Земле; собранное в таком маленьком объеме, оно создавало бы ужасающую силу тяготения. На такой звезде падение с высоты в одну сотысячную миллиметра равносильно падению с высоты в один километр в земных условиях. Под действием таких сил нейтронная звезда становится нестабильной в собственном поле тяготения, которое в конце концов будет преобладать над всеми другими силами. Звезда входит в стадию все более увеличивающегося сжатия.

Согласно теории Ньютона, которой пользовался Лаплас, вся масса звезды окажется в конце концов сосредоточенной в не имеющей размеров точке с бесконечной плотностью. Расчеты для таких экстремальных условий выполняются на основе общей теории относительности, созданной Эйнштейном в 1916 г.

Вклад общей теории относительности

Посмотрим, что говорит Эйнштейн. Бросив вверх камень, мы увидим, как он замедляется; следовательно, он теряет кинетическую энергию (энергию движения), в то время как его потенциальная энергия (энергия, зависящая от положения) увеличивается. Сумма этих двух энергий остается постоянной. Теперь направим вверх луч света. Так же, как и камень, он должен терять энергию движения, приобретая энергию потенциальную. Но поскольку, согласно принципу относительности, скорость света не может меняться и обязана оставаться постоянной и равной 300000 км/с, свет теряет энергию, уменьшая свою частоту, т.е. увеличивая длину волны. Из-за этого цвета радуги смещены в сторону красного. На Земле это смещение столь незначительно, что заметить его практически невозможно даже с помощью сверхчувствительной оптической аппаратуры. Такой эффект был обнаружен лишь при использовании γ -лучей (атомных часов), о которых говорилось в предыдущем разделе.

Свет так же, как и радиоволны, рентгеновские лучи и γ -излучение, представляет собой колебания электромагнитного поля, а звук, как известно, – это колебания воздуха. Все мы знаем, что звук испускается колеблющимся предметом, например струной рояля; мы знаем также, что частота звука совпадает с частотой колебания самой струны: звук «повторяет» колебания инструмента. А световые волны «повторяют» колебания электронов в атомах, радиоволны повторяют колебания электронов в излучающей антенне и т.д.

Допустим теперь, что мы повисли на воздушном шаре и смотрим вниз на источник света. Свет приходит к нам с уменьшенной частотой, соответствующей замедленным колебаниям в атоме. Таким образом, создается впечатление, что движения атомов, расположенных на уровне моря, замедлены, хоть и ненамного. Наши рассуждения можно распространить на любое движение; отсюда следует результат, имеющий универсальное значение: течение времени кажется замедленным внизу, на малой высоте над Землей, и ускоренным на большой высоте.

Течение времени рядом с черной дырой

Эффект усиливается, если часы находятся в кабине спутника, движущегося по орбите вокруг Земли, и учитывается при создании современных навигационных систем. На нейтронной звезде (также называемой пульсаром) замедление времени достигает ощутимых 10%. В предельном случае, как мы уже говорили, когда звезда находится в состоянии гравитационного коллапса, оказывается, что с точки зрения внешнего наблюдателя время на ее поверхности совсем останавливается. Следовательно, как это ни парадоксально, окончательный коллапс не наступает или, лучше сказать, откладывается навечно. Поэтому черная дыра не доходит до стадии сжатия в точку, предсказанной теорией Ньютона: время на поверхности «замораживается», играя космическую шутку, достойную Боргеса.

Если же читатель примет точку зрения наблюдателя, находящегося на поверхности такой звезды, то для него коллапс за считанные доли секунды приведет к невообразимой картине, увидеть которую сможет только сам наблюдатель; даже если он попытается послать сообщение по радио, радиоволны все равно не смогут оставить это небесное тело. Такому наблюдателю покажется, что во внешнем пространстве время летит ускоренно и мигом доходит до самого «конца всех времен».

Как же выглядит черная дыра извне? Ответ сложен и зависит от многих обстоятельств. Изолированная черная дыра – это темный объект, который, однако, обладает сильнейшим гравитационным полем; она проглатывает все (даже свет) и представляет собой превосходный космический пылесос. Известен источник рентгеновского излучения Лебедь X-1, наличие которого может быть объяснено, если допустить существование черной дыры, вращающейся на орбите вокруг гигантской синей звезды. Вещество этой звезды втягивается в черную дыру чудовищным раскаленным вихрем, где оно стремительно сжимается силами тяготения и нагревается до температур в миллионы градусов. Именно при таких условиях излучаются наблюдаемые рентгеновские лучи.

Описанная модель кажется вполне приемлемой, несмотря на то что она еще не получила всеобщего признания. Имеются веские указания на то, что в центре многих галактик существуют огромные черные дыры, в которые низвергаются целые звездные системы со своими планетами. Важная информация об этих явлениях уже получена с помощью рентгеновского телескопа «Эйнштейн», недавно выведенного на орбиту искусственного спутника Земли.

5. Взгляд на Вселенную

Физика черных дыр представляет собой такой раздел астрофизики, где теория относительности приводит к результатам удивительным и крайне интересным. Но для более глубокого понимания роли черных дыр необходимо расширить изучаемое нами пространство до космических масштабов.

Галактики

В нашу Галактику входит примерно сто миллиардов звезд; одна из них – наше Солнце – служит нам домом, и то, что она занимает заведомо нецентральное положение, позволяет нам обозревать как всю гигантскую структуру нашей Галактики, так и остальную часть Вселенной, не подвергая себя излишней опасности. На небесах Юга, свободных от загрязнения и городского освещения, центральная часть Галактики, расположенная в созвездии Стрельца, представляет собой ни с чем не сравнимое зрелище.

В 20-е годы между астрономами Шепли и Куртисом разгорелся ожесточенный спор о природе Галактики и других объектов, видимых с помощью телескопов. В числе этих объектов находится знаменитая туманность Андромеды (М31), которая видна невооруженным глазом всего лишь как звезда четвертой величины, но разворачивается в величественную спираль, если разглядывать ее в большой телескоп. Согласно Шепли, вся Вселенная состоит из одной нашей Галактики, а спиральные туманности типа М31 представляют собой более мелкие объекты, рассыпанные внутри ее, как изюм в куличе.

Куртис, напротив, считал, что М31 представляет собой самостоятельную галактику-остров, не уступающую в достоинстве нашей Галактике и отдаленную от нее на несколько сотен тысяч световых лет. Создание больших телескопов и прогресс астрофизики привели к признанию правоты Куртиса. Измерения, сделанные Шепли, оказались ошибочными: по его оценкам, диаметр нашей Галактики порядка 300000 световых лет (в три раза больше действительной величины), и он очень сильно недооценил расстояние до М31. Это не меняет того факта, что Шепли был выдающимся ученым, первым, кто дерзнул описать в общих чертах структуру Галактики, не говоря уже о его многочисленных основополагающих вкладах в самые различные разделы астрофизики. Куртис, впрочем, также ошибался: теперь мы знаем, что расстояние до М31 – целых два миллиона световых лет.

Как можно вообразить столь гигантские расстояния? Один световой год немногим меньше десяти тысяч миллиардов километров; воздушный лайнер летит со скоростью, в миллион раз меньшей, чем скорость света (300000 км/с), и расстояние в один световой год он мог бы преодолеть за один миллион лет. В фильме «Звездные войны» расстояния такого порядка покрываются запросто в течение нескольких часов. Мало кто из фантастов пытался разобраться, нет ли разумного пути для развития современной технической мысли, который позволил бы достичь звезд, а не только планет нашей системы, до которых теперь уж рукой подать. Некоторые из таких предложений, кажущиеся не слишком фантастическими, мы рассмотрим ниже.

Как мы уже говорили, Вселенная не исчерпывается нашей Галактикой даже вместе с галактикой М31. Новый общий каталог (NGC) содержит перечень около десяти тысяч галактик вместе с их важнейшими характеристиками (светимость, форма, отдаленность и т.д.) – и это лишь малая толика из десяти миллиардов галактик, в принципе различимых с Земли. Сказочный гигант, способный охватить взглядом сотню-другую миллионов световых лет, разглядывая Вселенную, увидел бы, что она заполнена космическим туманом, капельками которого являются галактики. Временами встречаются скопления, состоящие из тысяч галактик, собранных вместе; одно такое гигантское скопление находится в созвездии Девы.

В центре галактик

Внутри галактик происходят весьма внушительные явления. Мы уже говорили о сверхновых – звездах, которые взрываются с невероятной силой. Еще более впечатляющими являются некоторые катастрофические процессы, связанные с присутствием в центре Галактики «таинственных объектов» (правда, теперь не столь уж таинственных). Огромные облака межзвездной пыли делают невидимой центральную часть нашей Галактики. Только с помощью радиотелескопов можно проникнуть сквозь пыль и получить информацию «из первых рук» об этом интереснейшем районе, расположенном в направлении Стрельца. Дополнительные сведения дает наблюдение середины других галактик. Общая картина еще не завершена, но из уже имеющихся данных извлечена очень интересная информация.

Центральные части галактик заполнены звездами; на ночном небе планеты, вращающейся по орбите вокруг такой звезды, были бы видны мириады других ярчайших звезд. Многие из них – это красные гиганты или белые карлики; таким образом, речь идет о звездах, уже близких к концу своей карьеры. Все же ученые предполагают, что наиболее интересным объектом в галактике, как правило, является гигантская черная дыра, появившаяся в результате гравитационного коллапса какой-либо сверхзвезды; эта звезда могла в свою очередь родиться за счет многократных столкновений и слияния более мелких объектов.

До сих пор никто еще не видел этих черных сверхдыр, необъятных и ненасытных, способных разом проглатывать целые солнечные системы; масса их может изменяться в пределах от нескольких миллионов до миллиардов солнечных масс. Одну из галактик скопления в Деве-М87 – отличает неправильное распределение звезд в центральной ее части, что, возможно, связано с необычайно сильным гравитационным притяжением какой-то черной дыры. Да и в центре нашей Галактики находится странный радиоисточник диаметром примерно в один миллиард километров (несколько больше, чем орбита

Юпитера), который почти наверняка не является пульсаром, т.е. остатком взрыва сверхновой. Из-за отсутствия оптической видимости нам недостает очень важной информации об этом объекте. Тем не менее одна из наиболее захватывающих гипотез состоит в том, то мы здесь имеем дело с черной дырой, масса которой не превышает пяти миллионов солнечных масс.

Черные дыры превращают массу в энергию

Чтобы вдохнуть жизнь в свои предположения, астрофизики пытаются выяснить, каким образом черные дыры могут себя обнаружить. Оставленные в одиночестве, они даже не излучают свет, поэтому трудно что-либо узнать о них. Однако черная дыра, по-видимому, иногда может быть окружена облаками газа или множеством звезд, которые непрерывно ею захватываются; эти умирающие солнца должны двигаться со скоростями, сравнимыми со скоростью света, они должны быть подвержены сильнейшим приливам и отливам и в конце концов будут раздавлены. Все это выглядит как гигантский фейерверк, равных которому нет в космосе, если, конечно, не считать «большой взрыв». Более того, черная дыра должна очень эффективно превращать вещество в энергию в соответствии со знаменитой формулой $E = mc^2$. В термоядерных реакциях удается превратить в энергию не более 0,8% всей массы; в черной дыре эта цифра могла бы достичь 30...40%. Этим необыкновенно большим энерговыделением можно объяснить поразительные явления, происходящие в галактиках, а также мощнейшее излучение некоторых квазаров. Несколько миллионов лет назад упомянутая выше галактика М87 выбросила в четко определенном направлении большое количество вещества, что могло быть вызвано наличием в ее центре черной дыры. Радиоисточник 3С236 имеет две гигантские лопасти общей длиной, достигающей почти 20 млн. световых лет, что делает его самым протяженным объектом, который когда-либо наблюдал человек. Для таких колоссальных выбросов вещества необходимо также невообразимое количество энергии, какое не способны обеспечить обычные термоядерные реакции.

Другой объект, названный АО 0235+164 (это название придумано вовсе не Итало Кальвино, как может показаться), за несколько недель стал в десять тысяч раз ярче всей нашей Галактики.

Разумеется, такое разбазаривание энергии не может продолжаться долго. Разглядывая с помощью наших телескопов миры на расстояниях в миллиарды световых лет, мы находим множество сверхъярких объектов-квазаров, хотя столь же удаленные от нас галактики мы увидеть не можем, так как они светятся слишком слабо. Излучение квазаров исходит из очень маленькой (по космическим масштабам) центральной зоны и имеет характеристики, которые непрерывно меняются, как, например, в случае уже рассмотренного источника АО 0235+164. Общепринятое объяснение этого состоит как раз в том, что мы имеем дело с галактическими ядрами, содержащими черные дыры в активной стадии. Продолжительность жизни этих объектов невелика: меньше чем за 100 млн. лет они угасают, и жизнь галактики вновь возвращается в нормальное русло.

Это происходит, когда черная дыра «съедает» все окружающее ее вещество, создавая тем самым пустоту вокруг себя. В ближайшие годы ожидается такое накопление сведений о квазарах, что мы сможем описать их жизнь, а следовательно, и жизнь галактик во всех деталях. Новые данные, полученные с помощью телескопа «Эйнштейн», чувствительного к рентгеновскому излучению, говорят о том, что это «жизнеописание» находится еще только в начальной стадии. На современном уровне знаний о галактиках мы не можем пока ответить на все более настойчивые вопросы, касающиеся происхождения и структуры Вселенной.

6. Гравитационные линзы

Масштабы космоса действительно грандиозны по сравнению с масштабами человеческими: достаточно оглянуться, чтобы увидеть рассыпанные на расстояниях в несколько миллиардов световых лет друг от друга совершенно необычные объекты. Конечно, выбор объекта исследования зависит от личного вкуса, но надо признать, что квазары представляют исключительный интерес. Ниже мы подробно расскажем еще об одном явлении, известном с 1929 г.: все галактики летят прочь от нас со скоростями, пропорциональными расстояниям до них (закон Хаббла), т.е. Вселенная расширяется.

Квазары

Ученые обнаружили такие космические объекты, которые разлетаются с громадными скоростями, достигающими девяти десятых скорости света. Согласно закону Хаббла, это должны быть объекты, удаленные на десяток миллиардов световых лет и, следовательно, чрезвычайно яркие, раз их можно наблюдать с Земли. Эти источники энергии должны иметь ограниченные размеры, небольшие по сравнению с размерами галактик (отсюда и название «квазар» – квазизвездный объект), поскольку наблюдаются очень быстрые (в течение нескольких недель) изменения интенсивности их излучения. Широко распространено мнение, что мы здесь имеем дело с различными стадиями эволюции нормальной

галактики; появление черной дыры в ее центральной части привело бы к превращению вещества в энергию с чрезвычайно высокой эффективностью по сравнению с обычными термоядерными реакциями, происходящими в звездах.

Результатом этого было бы появление космической вспышки малой длительности (меньше 100 млн. лет), но огромной интенсивности и, следовательно, видимой на очень далеких расстояниях. Некоторые астрофизики, в том числе Арп, не согласны с таким подходом и считают, что можно поставить под сомнение само соотношение Хаббла, связывающее скорости разлетающихся космических объектов с расстояниями между ними. Правда, такая точка зрения не является общепринятой.

Эффект линзы

На этом сюрпризы, связанные с квазарами, не кончаются. В 1979 г. Уолш, Карсуэлл и Вейманн, изучая двойной квазар 0957+561 с двумя составляющими А и В, обнаружили, что их спектры излучения и скорости удаления одинаковы. Таким образом, речь шла не о случайном выстраивании в одну линию изображений двух объектов. Согласно одной захватывающей гипотезе, мы здесь имеем дело с двойным, а может быть, и с тройным изображением одного и того же объекта. Раздвоение изображения, по-видимому, вызвано тем, что между нами и квазаром расположена галактика большой массы. Действительно, как уже говорилось ранее, в 1919 г. английские ученые обнаружили, что свет звезд, проходя рядом с Солнцем, слегка отклоняется за счет притяжения светила. Гравитационное поле Солнца ведет себя как гигантская линза диаметром в несколько миллионов километров. Именно этот эффект, предсказанный общей теорией относительности Эйнштейна, принес ученому всеобщую известность и в течение длительного времени представлял собой единственное экспериментальное подтверждение теории. Наш квазар 0957+561 выявил существование гравитационных линз космических масштабов. Согласно Юнгу, Гунну Кристиану, Оке и Вестфалу, на пути между нами и квазаром находится скопление галактик, которое ведет себя как гравитационная линза; абберация этой линзы и приводит к раздвоению изображения. В настоящее время осуществляются очень сложные и точные эксперименты, результаты которых позволят прояснить детали двойного изображения, а следовательно, и формы галактической линзы.

Другие наблюдательные данные о галактических линзах

Впоследствии в подтверждение описанных результатов было получено известие об открытии еще одной галактической линзы, расположенной на пути к квазару 1115+080 и со всей очевидностью приводящей к наличию тройного изображения этого квазара.

Объекты такого рода представляют дальнейшее подтверждение теории относительности, если вообще в этом существует необходимость. Теория предсказывает, что количество изображений должно быть нечетным; и действительно, третье изображение, хотя и очень слабое, появляется на некоторых снимках квазара 0957+561, полученных с помощью большого радиотелескопа в Нью-Мексико. Более того, изображение квазара 1115+080, по всей видимости, является пятикратным. Согласно исследованиям группы Юнга, наличие многократных изображений может позволить провести новое измерение хаббловской константы расширения Вселенной, величина которой неоднократно пересматривалась и в настоящее время все еще является предметом дискуссий и полемики.

Если наши представления соответствуют действительности, то галактическая линза должна иметь колоссальные размеры, ее диаметр должен превышать миллионы световых лет, а в образование такой линзы должны давать вклад гравитационные поля целого скопления галактик. Мы находимся в преддверии новой эпохи в астрофизике, когда сведения о далеких галактиках будут получены путем исследования влияния их гравитации на свет, идущий от еще более далеких объектов, расположенных на одной с ними линии. Примерно десять миллиардов галактик можно наблюдать (во всяком случае, в принципе) в космосе; любой очень далеко расположенный квазар так или иначе оказывается на одной прямой с какой-нибудь более близкой к нам галактикой, которая искажает его изображение. До сих пор мы имели дело только с двумя крайними случаями таких искажений; наверняка существуют и другие искажения, которые еще не распознаны. Присутствие галактик искажает изображения далеких объектов, и наиболее удаленные области Вселенной выглядят деформированными, как дно горного потока. Относительность неизменно готовит нам все новые и новые сюрпризы.

7. Введение в космологию

Глубина и богатство содержания общей теории относительности проявляются в наибольшей мере, когда теория гравитации Эйнштейна используется для изучения явлений космических масштабов. В этом смысле общая теория относительности в громадной степени стимулировала развитие космологии.

Космические масштабы

Сколь велика Вселенная? На этот вопрос, который мне задают очень часто, трудно дать удовлетворительный ответ в нескольких словах. Ведь невозможно подступиться к важным темам современной космологии, не имея четкого представления хотя бы в общих чертах о размерах Вселенной и тех объектов, которые ее заполняют. Иногда удается объясниться, используя так называемую десятичную шкалу. Речь идет о последовательности объектов или расстояний, каждый из которых в десять тысяч раз больше предыдущего, причем отсчет начинается с размеров привычных, человеческих, и доходит до размеров Вселенной.

Итак, для начала возьмем характерный размер – высоту потолка, которую положим равной четырем метрам; затем умножим ее на десять тысяч и выйдем при этом в стратосферу (40 км). Следующий шаг приведет нас на Луну (400000 км), а умножив еще один раз на десять тысяч, мы попадем на границу Солнечной системы, удаленную на 4 млрд. км, т.е. на расстояние, которое свет пройдет за четыре часа. Мы уже находимся на четвертой ступени, соответствующей пределу, которого достигали автоматические станции, посланные с Земли. Следующий шаг катапультирует нас прямо к Альфе Центавра – ближайшей к нам звезде, удаленной на расстояние в 40000 млрд. км. Теперь уже один километр оказывается смехотворно маленьким, и в качестве единицы измерения используется световой год, который, как мы говорили выше, немногим меньше 10000 млрд. км, Альфа Центавра находится как раз на расстоянии 4,3 светового года, и таково типичное расстояние между звездами, расположенными вблизи Солнца.

Шестая ступенька приведет нас в недра Галактики – громадной линзообразной массы, заполненной сотнями миллиардов звезд. Солнце, которое находится на периферии, отдалено от центра Галактики чуть меньше чем на 40000 световых лет. Следующий шаг отнесет нас на расстояние в 400 млн. световых лет; при этом звезды уже заведомо слишком малы, чтобы быть видимыми с Земли, и Вселенная кажется нам равномерно заполненной миллиардами галактик, расстояния между которыми в среднем равны нескольким миллионам световых лет. Дальше продвигаться мы не можем: согласно представлениям современной космологии и имеющимся наблюдательным данным, невозможно увидеть объекты, отдаленные на расстояния, большие, чем примерно 12 млрд. световых лет. Таким образом, нам не хватило до последней ступеньки всего лишь множителя, равного 30.

В своей исчерпывающей, но, к сожалению, адресованной лишь специалистам книге, посвященной гравитации и космологии, известный физик Стив Вайнберг отмечает, что современная наука берет начало с открытия того, что Земля не является центром Вселенной. После проведенного здесь обсуждения, даже если философы и специалисты по истории науки будут нам возражать, мы сможем без труда согласиться с этим по причинам, о которых я не решаюсь говорить раньше времени. Во всяком случае развенчание нашей планеты явилось и началом современной космологии: оно породило космологический принцип.

Космологический принцип

Этот принцип утверждает, что в среднем Вселенная выглядит одинаково, в каком бы месте она ни рассматривалась.

Слова «в среднем» означают, что мы должны исследовать область Вселенной с диаметром порядка нескольких миллионов световых лет, что соответствует последнему отсчету нашей шкалы. Насколько можно судить, все имеющиеся наблюдательные данные согласуются с такой рабочей гипотезой. Космологический принцип необходим также и по менее благородным причинам: без него было бы почти невозможно решить сложнейшие уравнения поля Эйнштейна, которые описывают эволюцию Вселенной.

Биография космологического принципа поучительна, и ее стоит рассказать. В 1744 г. швейцарский астроном де Шезо и независимо от него в 1826 г. Ольберс сформулировали следующий парадокс, который привел к кризису тогдашних наивных космологических моделей. Представим себе, что пространство вокруг Земли бесконечно, вечно и неизменно и что оно равномерно заполнено звездами, причем их плотность в среднем постоянна. С помощью несложных вычислений Шезо и Ольберс показали, что полное количество света, посылаемое на Землю звездами, должно быть бесконечным, из-за чего ночное небо будет не черным, а, мягко говоря, залито светом. Чтобы избавиться от своего парадокса, они предположили существование в космосе обширных блуждающих непрозрачных туманностей, заслоняющих наиболее отдаленные звезды. На самом деле так выйти из положения нельзя: поглощая свет от звезд, туманности поневоле нагревались бы и сами излучали свет так же, как и звезды.

Итак, если справедлив космологический принцип, то мы не можем принять идею Аристотеля о вечной и не изменяющейся Вселенной. Здесь, как и в случае относительности, природа, похоже, предпочитает в своем развитии симметрию, а не мнимое аристотелево совершенство.

Возведение американским астрономом-меценатом Хейлом больших телескопов в обсерваториях Маунт-Вилсон и Паломар привело к целой серии ключевых с точки зрения современной космологии открытий. Прежде всего выяснилось, что при обсуждении парадокса Ольберса речь должна идти о галактиках, а не об отдельных звездах; кроме того, была установлена шкала расстояний в пространстве, о

которой я уже рассказывал в несколько свободном стиле. Столь же важным оказалось признание того, что Вселенная непрерывно изменяется, являясь ареной внушительных эволюционных явлений, а также введение правильной шкалы времени для процессов, там происходящих.

Было установлено, что звезды обретают свою энергию, превращая водород в более тяжелые элементы с помощью серии сложных термоядерных реакций. Это не может происходить бесконечно; когда горючего не остается, каждая звезда гаснет, переживая по-своему более или менее бурный конец. Такая звезда, как наше Солнце, живет в среднем около десятка миллиардов лет.

Расширение Вселенной

Длинная цепь открытий увенчалась в высшей степени важным событием в 1929 г., когда Хаббл обнаружил, что в космосе «все разбегается». Согласно Хабблу да и большинству современных астрофизиков, галактики разбегаются со скоростями, пропорциональными расстояниям до них. Галактика, находящаяся на расстоянии 100 млн. световых лет, удаляется от нас со скоростью порядка 2000 км/с; если расстояние до галактики в два раза больше, то и скорость удаления удваивается, и т.д. Вселенная расширяется, следовательно, она не является неизменной. Речь идет о глобальном космическом явлении, имеющем огромные масштабы, такие, что сами галактики уже кажутся всего лишь пылинками.

Прокручивая ретроспективно киноленту о жизни Вселенной, мы могли бы увидеть, что было время, а именно около 15...20 млрд. лет тому назад, когда все галактики были собраны вместе в одной точке. Разумеется, к такой оценке нужно относиться с осторожностью и представлять, что она справедлива только по порядку величины. Во-первых, гравитационное притяжение непрерывно замедляет движение галактик; во-вторых, почти наверняка галактики сами образовались лишь примерно через миллиард другой лет после начала расширения. Но остается фактом, что Вселенная когда-то начинала свое развитие, будучи намного более плотной и занимая область намного меньшую, чем в настоящее время; ее эволюцию можно сравнить разве что с гигантским взрывом глобального масштаба – с так называемым «большим взрывом». Примечательно, что указанный масштаб времени в общем согласуется с результатами, полученными при исследовании эволюции звезд.

Как уже говорилось, чем дальше находятся участки Вселенной, тем быстрее они от нас удаляются; галактики представляются нам такими, какими они были в далеком прошлом, поскольку свету, идущему от них, требуется время, чтобы до нас дойти. Таким образом, большие телескопы совершают, кроме всего прочего, путешествие в прошлое. Наблюдая все более далекие объекты, мы видим, как они разлетаются со скоростями, которые все ближе и ближе к непреодолимому барьеру – скорости света. Существуют квазары – объекты, крайне яркие и видимые на громадных расстояниях, – которые удаляются со скоростями в 285000 км/с, что лишь немного меньше скорости света, равной 300000 км/с.

Если бы мы могли увидеть какие-нибудь объекты, «приставленные к стенке скорости света», то они бы выглядели так же, как у истоков Вселенной. Но не все объекты, содержащиеся во Вселенной, можно будет когда-нибудь увидеть (вот выход из парадокса Ольберса!); свет от объектов, расположенных дальше определенного расстояния, так и не успевает дойти до нас, и они навсегда остаются скрытыми от наших взоров, так же как слишком далекое здание на поверхности Земли скрыто за горизонтом.

Но, если все галактики удаляются от нашей, не означает ли это, что Земля – центр Вселенной?

Ответ по-прежнему отрицательный. Расстояния между любыми галактиками увеличиваются со скоростями, пропорциональными самим расстояниям, и человек, оказавшийся случайно в пределах другой галактики, обнаружит справедливость того же закона Хаббла. При этом его горизонт окажется смещенным, и он сможет увидеть то, что скрыто от нас, в то время как другие объекты, видимые с Земли, будут скрыты от него.

Искривление Вселенной

Общая теория относительности, созданная Эйнштейном в 1916 г., просто и естественно учитывает механизм «большого взрыва». В этой теории присутствие вещества приводит к изменению геометрии пространства на космическом уровне. До сих пор из-за нехватки наблюдательных данных эти изменения не могут быть оценены в полной мере; в частности, пока нет достаточно точных данных о полном количестве вещества во Вселенной. Согласно модели (называемой моделью Фридмана), которую предпочитал Эйнштейн, Вселенная содержит достаточно вещества, чтобы быть искривленной настолько, что она замыкается на саму себя, как, например, воздушный шарик. Если надувать такой шарик, то любая картинка, нарисованная на его поверхности, увеличивается в размере, сохраняя при этом те же пропорции между своими частями. Каким-нибудь муравьям, живущим в таком мире, покажется, что они друг от друга удаляются, но ни один из них не будет иметь достаточно основания считать себя центром Вселенной. Согласно представлениям этой модели, расширение Вселенной должно прекратиться примерно через 40

млрд. лет, после чего должно начаться сжатие, в результате чего еще через 100 млрд. лет Вселенная снова окажется в состоянии большой плотности.

Основная трудность, которая встречается при объяснении модели Фридмана, возникает при определении того, что собой представляет внутренний объем воздушного шарика. В нашем мире можно передвигаться вдоль трех направлений: север – юг, запад – восток, вверх – вниз; в мире, который расположен на поверхности воздушного шарика, остаются только первые два. Третье направление (измерение) используется здесь для обозначения кривизны к носит, таким образом, лишь методический характер. Поэтому, хотя наша Вселенная также имеет кривизну, но необходимость введения каких-либо измерений, кроме привычных трех, существует лишь с методической или математической точек зрения; как учили Гаусс и Риман, нет смысла покидать наш мир, чтобы познавать его свойства.

Вслед за началом

Какой же была Вселенная в момент своего рождения? Наш вопрос имеет смысл, только если он относится к мгновению, следующему непосредственно за началом, т.е. к моменту времени, когда применение физических законов становится уже разумным. Спустя всего одну сотую секунды после начала космос занимал гораздо меньший объем, чем теперь, и был заполнен сжатым веществом при температуре в миллиарды градусов с плотностью в триллионы раз выше, чем плотность воды. В этих условиях не могли существовать ни ядра, ни тем более атомы, которые были бы разрушены бурным тепловым движением. Расширение Вселенной происходило с очень большой скоростью.

Через несколько минут расширение Вселенной и ее охлаждение достигли такой степени, что стало возможным образование атомных ядер. Спустя еще миллион лет температура упала ниже трех тысяч градусов, и началось образование атомов. Бросив взгляд вокруг себя в ту эпоху, мы увидели бы пространство, заполненное облаком из раскаленных газов и ослепляющим светом. Еще через миллиард лет началось образование галактик, звезд и стабильного вещества в современном виде.

Свет, излученный первоначальным газовым облаком, все еще бродит во Вселенной; претерпев сильные изменения при расширении Хаббла, он сейчас заметен только в виде микроволнового фона (так называемого «реликтового излучения»). Это самое древнее из всех известных свидетельств истории нашей Вселенной. Оно было обнаружено двумя астрофизиками из лаборатории фирмы «Белл телефон» Пензиасом и Уилсоном, удостоенными за свое открытие Нобелевской премии в 1978 г.

Мы подошли к последнему вопросу: какова научная достоверность теории «большого взрыва»? Разумеется, не может быть полной уверенности в выводах, сделанных на границе человеческих знаний и основанных на рискованных экстраполяциях. Но в самых общих чертах теория «большого взрыва» кажется вполне справедливой, и уж наверняка она представляет собой наилучшую из имеющихся в настоящее время рабочих гипотез. Во всяком случае, панорама, которую открывает нам эта теория, грандиозна и поистине захватывающая.

8. Большой взрыв

Сейчас мы снова, но уже более углубленно обсудим ряд вопросов, которые были затронуты ранее, в частности теорию «большого взрыва».

Парадокс Ольберса

Мы уже говорили о том возражении, которое выдвинули де Шезо и Ольберс против представлений начинавшей зарождаться космологии. В то время считалось, что космическое пространство бесконечно, равномерно заполнено звездами и в таком состоянии пребывает вечно. Де Шезо и Ольберс исходили из всем известного факта, что небо темнеет, когда заходит солнце.

Логика их рассуждений не меняется, если допустить, что все звезды имеют одинаковую светимость. Представим теперь, что окружающее нас пространство разделено на концентрические сферические слои одинаковой толщины. Объем одного такого слоя равен произведению его толщины на площадь его поверхности, и, следовательно, количество звезд, находящихся в одном слое, в среднем пропорционально площади его поверхности, т.е. квадрату его радиуса. Поэтому если мы удвоим радиус какого-либо сферического слоя, то обнаружим в нем вчетверо больше звезд, каждая из которых, находясь уже на расстоянии вдвое большем, чем прежде, светится вчетверо слабее. Таким образом, яркость света, дошедшего до нас, останется прежней. Более того, существует бесконечное число таких сферических слоев, и от каждого до нас доходит свет одинаковой яркости. Если продолжить наши рассуждения, придется сделать вывод, что мы можем получать сколь угодно большое количество света, и небо должно нам казаться бесконечно ярким! Даже при наличии в космосе непрозрачной пыли положение не изменится: поглощая свет от звезд, пыль нагревалась бы и сама излучала свет.

Таким образом, либо Вселенная не является бесконечной, либо она не вечна и изменяется со временем, либо, наконец, несправедлив космологический принцип, т.е. звезды распределены неравномерно. Утверждение, что Вселенная не изменяется во времени, во всяком случае, заведомо неверно: любая звезда получает свою энергию от термоядерного источника, который хотя и очень мощный, но все же не является неисчерпаемым; так, Солнце светит в течение более 5 млрд. лет и будет еще светить не более 10 млрд. лет. Мы еще не знаем, бесконечна ли Вселенная; ответ на этот вопрос зависит от результатов очень тонких наблюдений за галактиками. Тем не менее общепринятое мнение таково: в какой-то степени пересмотренный космологический принцип (место звезд займут галактики) должен быть сохранен.

Закон Хаббла

Самый серьезный удар незыблемости Вселенной был нанесен не теорией эволюции звезд, а результатами измерений скоростей удаления галактик, полученными Хабблом. Чтобы по достоинству оценить результат Хаббла, нужно помнить, что звезды не рассеяны во Вселенной равномерно: они, наоборот, сгруппированы в отдельные «острова» – галактики, каждая из которых включает в себя в среднем более 100 млрд. звезд, а также межзвездный газ и межзвездную пыль; галактики в большинстве своем имеют «правильную» форму спирали или эллипса, при этом диаметр галактики может достигать и даже превосходить 100000 световых лет. Млечный путь как раз представляет собой одну такую галактику, ту самую «Галактику», которая включает в себя в качестве незначительной периферийной звезды и наше Солнце.

В действительно космическом масштабе мы имеем дело уже не со звездами, а с галактиками как отдельными объектами, расстояния до которых измеряются миллионами световых лет.

Итак, Хаббл в результате целой серии кропотливых измерений обнаружил, что любая галактика удаляется от нас в среднем со скоростью, пропорциональной расстоянию до нее, с коэффициентом пропорциональности, равным примерно 20 км/с на миллион световых лет. Например, галактика, находящаяся на расстоянии в 100 млн. световых лет, удаляется от нас со скоростью 2000 км/с. Как уже говорилось, обнаружены квазары, которые удаляются от нас со скоростью 285000 км/с и которые, следовательно, находятся на расстояниях порядка 10 млрд. световых лет.

Открытие Хаббла окончательно разрушило существовавшее со времен Аристотеля представление о статичной, незыблемой Вселенной, уже, впрочем, ранее получившее сильный удар при открытии эволюции звезд. Значит, галактики вовсе не являются космическими фонарями, подвешенными на одинаковых расстояниях друг от друга для утверждения сил небесных, и, более того, раз они удаляются, то когда-то в прошлом они должны были быть ближе к нам.

Удаляясь со скоростью 20 км/с, галактика проходит примерно 600 млн. км за год, или 60 световых лет за миллион лет; на то, чтобы преодолеть (при постоянной скорости) тот миллион световых лет, который нас разделяет, ей, по-видимому, понадобилось несколько меньше, чем 20 млрд. лет. Следовательно, около 20 млрд. лет тому назад все галактики, судя по всему, были сосредоточены в одной точке, поскольку (согласно закону Хаббла) галактики, которые находятся на расстояниях в десять раз больше других, имеют в десять же раз большую скорость; следовательно, время удаления одинаково для всех галактик.

Интуитивные модели расширения Вселенной

Можно подойти к вопросу о хаббловском расширении космоса, используя более привычные, интуитивные образы. Например, представим себе солдат, выстроенных на какой-нибудь площади с интервалом 1 м. Пусть затем подается команда раздвинуть за одну минуту ряды так, чтобы этот интервал увеличился до 2 м. Каким бы образом команда ни выполнялась, относительная скорость двух рядом стоявших солдат будет равна 1 м/мин, а относительная скорость двух солдат, стоявших друг от друга на расстоянии 100 м, будет 100 м/мин, если учесть, что расстояние между ними увеличится от 100 до 200 м. Таким образом, скорость взаимного удаления пропорциональна расстоянию. Отметим, что после расширения рядов остается справедливым космологический принцип: «галактики-солдаты» по-прежнему распределены равномерно, и сохраняются те же пропорции между различными взаимными расстояниями.

Единственный недостаток нашего сравнения заключается в том, что на практике один из солдат все время стоит неподвижно в центре площади, в то время как остальные разбегаются со скоростями тем большими, чем больше расстояния от них до центра. В космосе же нет верстовых столбов, относительно которых можно было бы провести абсолютные измерения скорости; такой возможности мы лишены теорией относительности: каждый может сравнивать свое движение только с движением рядом идущих, и при этом ему будет казаться, что они от него убегают.

Мы видим, таким образом, что закон Хаббла обеспечивает неизменность космологического принципа во все времена, и это утверждает нас в мнении, что как закон, так и сам принцип действительно справедливы.

Другим примером интуитивного образа может служить взрыв бомбы; в этом случае чем быстрее летит осколок, тем дальше он улетит. Спустя мгновение после самого взрыва мы видим, что осколки распределены в соответствии с законом Хаббла, т.е. их скорости пропорциональны расстояниям до них. Здесь, однако, нарушается космологический принцип, поскольку если мы отойдем достаточно далеко от места взрыва, то никаких осколков не увидим. Этим образом подсказан самый знаменитый в современной космологии термин «большой взрыв» (the big bang). Согласно этим представлениям, около 20 млрд. лет тому назад все вещество Вселенной было собрано в одной точке, из которой началось стремительное расширение Вселенной до современных размеров.

Но где же находится эта отправная точка? Ответ: нигде и в то же время повсюду; указать ее местонахождение невозможно – это противоречило бы космологическому принципу. Еще одно сравнение, возможно, поможет нам понять это утверждение.

Согласно общей теории относительности Эйнштейна, присутствие вещества в пространстве приводит к искривлению последнего. При наличии достаточного количества вещества (мы вернемся к этому позже) можно построить модель искривленного пространства, напоминающего искривленную поверхность Земли. Передвигаясь на Земле в одном направлении, мы в конце концов, пройдя 40000 км, должны вернуться в исходную точку. В искривленной Вселенной случится то же самое, но спустя 40 млрд. световых лет; кроме того, «роза ветров» не ограничивается четырьмя частями света, а включает направления также вверх – вниз, или, лучше, зенит – надир. Итак, Вселенная напоминает надувной шарик, на котором нарисованы галактики и, как на глобусе, нанесены параллели и меридианы для определения местоположения точек; но в случае Вселенной для определения положения галактик необходимо использовать не два, а три измерения. А можно ли взглянуть внутрь надувного шарика? Для этого пришлось бы выйти в четвертое измерение, чего ни один физик не умеет делать; и хотя, вообще говоря, можно использовать и шесть измерений, все мы в общем сходимся на том, что речь здесь идет всего лишь о некоей игре слов, а всю физику вполне можно осознать, удобно разместившись или, лучше сказать, будучи нарисованными на поверхности такого воздушного шарика.

Расширение Вселенной напоминает процесс надувания этого шарика: взаимное расположение различных объектов на его поверхности не меняется; на шарике нет выделенных точек; площадь, на которой были выстроены солдаты, теперь представляет всю Вселенную; площадь эта весьма странная: выходим через калитку на север, а, возвращаясь, обнаруживаем, что появляемся на площади с южной стороны, и т.д.

Недостающая масса

Галактики притягиваются друг к другу согласно закону Ньютона, который, если его видоизменить соответствующим образом, будет справедлив также и в теории Эйнштейна и по которому они должны все время почти незаметно замедляться. Измерение этого замедления позволило бы узнать, сколько вещества присутствует во Вселенной. К сожалению, очень трудно выполнить такое измерение, зависящее от наблюдений самых далеких и, следовательно, самых «молодых» галактик (если учесть то длительное время, которое требуется свету, чтобы до нас дойти, то получится, что галактика, удаленная от нас на 5 млрд. световых лет, будет восприниматься такой, какой она была 5 млрд. лет тому назад, т.е. в момент излучения света). Движение молодых галактик должно казаться не столь замедленным, что должно привести к незначительному отклонению от закона Хаббла. Но оценить расстояние до таких галактик очень трудно, в частности потому, что в течение миллиардов лет сами они могут существенно эволюционировать.

Другой способ оценить полное количество вещества во Вселенной состоит в простом подсчете всех галактик вокруг нас.

Поступая таким образом, мы получим вещества меньше (примерно в десять раз), чем необходимо, чтобы, согласно Эйнштейну, замкнуть «воздушный шарик» Вселенной. Но это не такая уж беда. Существуют модели открытой Вселенной, математическая трактовка которых столь же проста (или сложна, в зависимости от точки зрения) и которые объясняют нехватку вещества. С другой стороны, может оказаться, что во Вселенной имеется не только вещество в виде галактик, но и невидимое вещество 1 (например, нейтринный газ, о котором мы будем говорить ниже) в количестве, необходимом, чтобы Вселенная была замкнута; полемика по этому поводу до сих пор не затихает.

Хроника первых миллионов лет

Чтобы получить ответ на этот вопрос, были проведены исследования начальной стадии эволюции Вселенной, наступившей непосредственно за «большим взрывом». Невозможно начать рассказ о «сотворении мира» непосредственно с момента «нуль», т.е. начиная с сакраментального изречения «Да будет свет!». Этот момент есть всего лишь математический образ, присутствующий в уравнениях Эйнштейна; никто не может гарантировать, что законы физики остаются справедливыми для такого

состояния вещества, при котором весь космос оказывается сжатым до размеров спичечной головки. Нам придется удовлетвориться тем, что отправной точкой мы будем считать десятитысячную долю секунды после самого начала. Из проделанных вычислений следует, что радиус кривизны Вселенной в этот момент равнялся примерно одной тридцатой части светового года, т.е. 300 млрд. км, что в тысячу раз превышает размеры Солнечной системы. Хотя это и колоссальная величина, но она ничтожна по сравнению с размерами современной Вселенной. Таким образом, вещество находилось в крайне сжатом состоянии с плотностью в тысячи миллиардов раз больше, чем плотность воды, и при чрезвычайно высокой температуре порядка одного триллиона градусов. Происходящее в космосе можно было бы сравнить, например, с быстрым расширением воздуха, нагретого при сжатии его в велосипедном насосе. Чем же был заполнен космос в эти мгновения?

Напомним, что температура газа представляет собой не что иное, как меру средней энергии составляющих его частиц. Если эти частицы попытаться нагреть, до триллиона градусов, то они будут сталкиваться друг с другом с такой силой, что атомы разобьются на ядра и электроны; в свою очередь ядра разобьются на нейтроны и протоны, из которых они состоят. Более того, энергия разлетающихся частей будет столь высока, что сможет материализоваться согласно формуле $E = mc^2$ и привести к появлению вещества – антивещества (пар мюонов и электрон-позитронных пар).

Космические соударения сначала происходят в неистовом ритме, который со временем затихает; в конце концов столкновения становятся совсем редкими. Расширяясь, Вселенная охлаждается со скоростью, обратно пропорциональной ее радиусу. В свою очередь радиус Вселенной увеличивается как корень квадратный из прошедшего времени; так, например, при увеличении времени от одной до четырех секунд радиус Вселенной увеличится в два раза, в то время как температура уменьшится вдвое. По прошествии одной секунды после начала пропадают мюоны и начинается образование более стабильных ядер (главным образом ядер гелия, или α -частиц, состоящих из двух протонов и двух нейтронов). В течение последующих трех минут нуклеосинтез по существу заканчивается.

Спустя четверть часа после начала (т.е. примерно через 1000 секунд) радиус Вселенной достигает 100 световых лет, а температура равна «всего лишь» 300 млн. градусов, что сравнимо с температурой, наблюдаемой при термоядерных взрывах. С этого момента наблюдается более медленное охлаждение Вселенной наряду с ее расширением, и пройдет еще миллион лет, прежде чем произойдет новый качественный скачок в картине развития Вселенной. Температура при этом упадет уже до четырех тысяч градусов, и свободные электроны начнут рекомбинировать с ядрами, образуя атомы, которые, наконец, будут способны противостоять уменьшившемуся уровню тепла.

Реликтовое излучение

Что бы мы увидели, если бы могли окинуть взглядом пространство в ту далекую первоначальную эпоху?

Яркость равномерного свечения неба всего в десять раз меньше, чем у поверхности Солнца (что очень близко к яркости свечения солнечных пятен, в свою очередь сравнимой с яркостью дуговой лампы). Жара, как в аду, поддерживает вещество в возбужденном состоянии, не давая ему конденсироваться. После образования атомов вещество становится прозрачным для света, и свет блуждает в течение миллиардов лет по всей Вселенной вплоть до наших дней. Почему же мы его не видим? Ответ состоит в том, что его все-таки удалось увидеть, хотя и не в виде «света» в обычном смысле. Расширение Вселенной приводит к смещению цветов спектра в сторону красного (при удалении источника увеличивается длина волны света). Эффект становится очень заметным, если он накапливается в течение всей предшествующей жизни космоса; излучение становится микроволновым, невидимым для глаза; его, однако, можно зарегистрировать с помощью радиотелескопов, что и сделали Пензиас и Уилсон в 1965 г. (в лабораториях фирмы «Белл»). Результаты этих исключительно важных наблюдений дают наиболее веское подтверждение гипотезы «большого взрыва». Реликтовое излучение (именно так его называют) представляет собой самое древнее из имеющихся свидетельств нашей эволюции; оно было испущено, когда прошло меньше одной тысячной доли всей жизни Вселенной. В те времена динозавры еще маячили как призраки далекого будущего, египетские пирамиды могли бы восприниматься как начало сегодняшнего дня, и все это представляло незначительные события в жизни незначительной планеты, принадлежащей второстепенной галактике.

Роль дейтерия

Существуют ли причины, кроме простого любопытства, по которым следует определять различные численные характеристики «сверххарева» вещества, появившегося вслед за «большим взрывом»? Да, и вот одна из них.

Из вычислений следует, что оставшийся «пепел» должен был состоять примерно на три четверти из водорода; остальная часть – это гелий и очень малые примеси более тяжелых элементов. Не случайно, что такой же начальный состав галактического вещества получается и из данных о эволюции звезд. Кроме того, в этом месиве должен был присутствовать тяжелый изотоп водорода – дейтерий, относительно легкий по сравнению с другими ядрами. По всей видимости, дейтерий не может создаваться в горниле звездных печей, где он бы сразу превращался в гелий или так или иначе разрушался. Поэтому встречающийся в настоящее время дейтерий (даже в стенах домов) должен был сохраниться еще со времени «большого взрыва». Если Вселенная действительно была тогда очень плотной (настолько, чтобы быть замкнутой), то, как показывают расчеты, частые столкновения дейтонов (ядер дейтерия) с другими ядрами чрезвычайно быстро привели бы к их разрушению.

Таким образом, обнаружение значительного количества дейтерия в нынешней Вселенной указывало бы на малую плотность вещества в ней, т.е. на то, что Вселенная открыта. Наблюдения нашей Галактики, судя по всему, подтверждают существование межзвездных облаков, состоящих из дейтерия, что говорит в пользу модели открытой Вселенной, по крайней мере временно, поскольку не исключена возможность того, что будет обнаружен остроумный способ образования дейтерия в звездах, противоречащий нашим рассуждениям.

Образование галактик

Каковы же размеры современной Вселенной и когда появились галактики?

Образование галактик началось только спустя миллиард лет после «большого взрыва». К этому моменту вещество уже успело охладиться до идиллических температур (всего в сотню градусов) и стали появляться стабильные флуктуации плотности среди облаков газа, равномерно заполнявших космос. Локальное увеличение плотности вещества оказывается стабильным, если плотность достаточно велика, так как в этом случае создается локальное гравитационное поле, способствующее сохранению вещества в сжатом состоянии.

Продолжая сжиматься и теряя при этом энергию на излучение, уплотнившееся вещество в результате своей эволюции превращалось в современные галактики. Хотя в общих чертах нам ясно, что тогда происходило, но механизм образования галактик все же понят не до конца и противоречит аккуратным подсчетам наблюдаемых масс галактик и их скоплений. Так что работы осталось много. Проникая с помощью телескопов все дальше в глубь космоса, мы обнаруживаем, что самые далекие объекты перемещаются со скоростями, вплотную приближающимися к скорости света, и поэтому они перестают быть видимыми. Где-то вдалеке существует горизонт, и свет от объектов, находящихся за ним, до нас еще не дошел; находится этот горизонт на расстоянии примерно 12 млрд. световых лет. Насколько можно судить, космос заполнен множеством галактик (десятками миллиардов), объединенных в гигантские скопления, содержащие сотни и тысячи галактик.

Замкнута или открыта Вселенная?

Если Вселенная замкнута, то она должна достичь предельных размеров, после чего расширение сменится сжатием, и примерно через 100 млрд. лет, пройдя в обратном порядке все этапы своего пути, Вселенная снова сожмется в точку.

Если же Вселенная открыта, то она будет расширяться до тех пор, пока галактики не уйдут за пределы видимости друг друга. В конце концов мы дойдем до абсолютно темных небес.

Если бы вся эта колоссальная космическая машина имела единственной целью сотворение Земли, можно было бы удивляться напрасной трате времени или упущенным возможностям, во всяком случае, если, как мы подозреваем, наша планета – единственная, принявшая разумную жизнь.

В действительности Вселенная потратила не слишком много времени на создание жизни: 20 млрд. лет хоть и кажутся целой вечностью, на самом деле представляют собой лишь минимум, необходимый для того, чтобы где-то в недрах звезд начался синтез элементов, нужных для поддержания живых организмов. И если разобраться, то около трех миллиардов лет назад уже существовали водоросли и простейшие.

Должны ли мы доверять теории «большого взрыва»? В общем я бы дал положительный ответ на этот вопрос; или, что еще лучше, можно считать ее захватывающей рабочей гипотезой, которая приподнимает завесу над нашим далеким прошлым вплоть до самых истоков.

9. Нейтрино и космология

Более подробное описание Вселенной на первых этапах ее развития следует предварить некоторыми сведениями о главных (или кажущихся таковыми) составляющих космического вещества. К этой захватывающей теме мы еще вернемся в дальнейшем.

Согласно представлению большинства людей, представлению, давшему жизнь в 30-х годах многочисленным рисованным картинкам и карикатурам, атом похож на маленькую солнечную систему, в которой роль Солнца играет центральное ядро, вокруг которого вращаются по своим орбитам электроны. Число электронов меняется от атома к атому и определяет химический элемент; водород имеет всего один электрон, в то время как в уране их уже 92. Физикам удалось исследовать также и ядро, и выяснилось, что оно состоит из нуклонов двух сортов – протонов и нейтронов. Речь идет о почти одинаковых частицах, отличающихся друг от друга только тем, что электрический заряд протона положителен, в то время как нейтрон заряда не имеет.

Нейтрино

Кроме того (и здесь мы подошли к основному предмету нашего обсуждения), нейтрон, не входящий в состав ядра, распадается меньше чем через двадцать минут на протон, электрон и новую частицу, нейтрино, которую можно грубо представить как «нейтральный электрон», т.е. электрон без электрического заряда.

Нейтрино принесло много хлопот физикам. Оно практически не взаимодействует с веществом и может пройти сквозь бетонную стену толщиной в несколько световых лет, не встретив при этом никаких препятствий. Десятки лет его существование связывали только с исчезновением энергии при распаде нейтрона. Ферми в свое время пришел к правильному выводу, что эта энергия должна быть унесена невидимой частицей, «легким нейтроном», нареченным нейтрино.

Только в послевоенное время создание больших атомных реакторов и позже мощных ускорителей частиц в ЦЕРНе (Европейский центр ядерных исследований в Женеве) и Брукхейвене (США) позволило непосредственно заметить нейтрино. На этих мощных машинах производятся пионы очень высоких энергий, которые рождаются при столкновениях ускоренных протонов с мишенью (обычно состоящей из других протонов или из ядер). Пионы – это частицы с чрезвычайно малым временем жизни, и, родившись, они тут же распадаются, производя на свет, кроме всего прочего, и нейтрино.

Появившиеся нейтрино имеют очень высокую энергию, а с увеличением энергии вероятность взаимодействия нейтрино с веществом также увеличивается. При высоких энергиях нейтрино удается зарегистрировать с помощью детекторов некосмических размеров. В ядерных реакторах же рождается огромное количество нейтрино с низкими энергиями; ничтожная часть их может поглотиться в баке, содержащем несколько десятков тонн жидкости, похожей на глицерин. Нейтрино, попадающие в этот бак, могут вызвать характерные реакции, чем и обнаруживают себя.

Имеют ли нейтрино массу?

В термоядерных реакциях, происходящих в недрах Солнца, также рождаются нейтрино. Попытки экспериментаторов зарегистрировать их по характерным реакциям не привели к успеху: число обнаруженных нейтрино оказалось намного ниже, чем ожидалось, что подорвало веру в правильность современных представлений о процессах, идущих в недрах Солнца. Для разрешения возникших сомнений было предложено провести другие, весьма остроумные (и дорогостоящие) эксперименты с использованием экзотических минералов, таких, как, например, лорандит из Черногории, или редких металлов типа галлия в больших количествах. Поживем – увидим.

Согласно Понтекорво, нехватка солнечных нейтрино объясняется тем, что на пути от Солнца к Земле часть их успевает превратиться в нейтрино другого сорта, а эти другие нейтрино зарегистрировать в обычном эксперименте невозможно. Прямое отношение к этой гипотезе имеет вопрос о массе нейтрино. Имея практически массу, равную нулю, нейтрино перемещается со скоростью света. В действительности нейтрино могло бы иметь массу порядка одной тридцатитысячной массы электрона, что не противоречило бы результатам современных экспериментов. Измерение массы нейтрино, выполненное советскими учеными, дало величину как раз такого порядка. Этот результат ждет своего подтверждения. Другие данные, собранные вместе, также, по-видимому, свидетельствуют в пользу гипотезы массивного нейтрино, хотя каждый отдельный результат сам по себе не выглядит достаточно убедительно.

К этому моменту у читателя мог возникнуть вполне законный вопрос: какова же причина столь большого интереса к такой неуловимой частице и ее исчезающе малой массе?

Причина эта основана прежде всего на соображениях симметрии, по которым нейтрино отводится вполне определенная и важная роль при классификации элементарных частиц. Но к этому вопросу мы еще вернемся.

Реликтовые нейтрино

Мне самому кажется столь же важной и, возможно, понятной для непосвященных другая причина повышенного интереса к массе нейтрино. Согласно теории, в первые минуты жизни Вселенной появилось огромное количество нейтрино, которые до сих пор блуждают в космических просторах и роль и

происхождение которых делают их похожими на реликтовое излучение, обнаруженное Пензиасом и Уилсоном.

Не существует разумных доводов в пользу возможности увидеть когда-нибудь эти нейтрино, во всяком случае если это не будет связано с действительно новым и революционным открытием. Если бы нейтрино имели массу, то, как показали вычисления, их общая масса могла бы быть в 30 раз больше, чем вся масса обычного вещества, рассеянного в космосе. Нейтрино могли бы восполнить «недостающую массу», нужную для того, чтобы Вселенная была замкнута, на чем настаивают одни и против чего выступают другие. Согласно этой гипотезе, мы купаемся в «нейтринном море», вовсе не сознавая этого, если не считать наблюдений за самыми далекими галактиками.

Вообще говоря, вся эволюция вещества в нашей Вселенной в конечном счете подвержена влиянию этого нейтринного моря. Возможно, наши потомки научатся регистрировать реликтовые нейтрино и сумеют заглянуть непосредственно в космос времен нескольких минут после «большого взрыва», когда наступал критический момент для синтеза элементов. Таким образом, речь идет не об идее, представляющей лишь академический интерес, а о фундаментальных вопросах, непосредственно связанных с ключевыми направлениями современной космологии, с проблемой наших истоков.

10. Космический корабль будущего

Американская автоматическая станция (зонд), облетевшая Юпитер, послала на Землю изумительные фотографии самой планеты и ее двух спутников. Тот же зонд с помощью поля тяготения Юпитера был далее направлен в сторону Сатурна и достиг его в точно намеченное время после путешествия, длительность которого поражает воображение. Об этом сейчас мало кто вспоминает, и, если не считать ссылок вскользь в журнальных статьях, видно, что это событие интересует очень немногих. Похоже, что двери в грандиозный космический цирк, приковавший всех к экранам телевизоров во время первой посадки на Луну, на этот раз оказались закрытыми. Однако действительно интересная страница в исследовании космоса открывается только теперь. Пройдут десятки лет, прежде чем человек отважится – если вообще ему это удастся – отправиться в сторону других планет. Автоматические же станции уже достигают пределов Солнечной системы, и мы наконец начинаем узнавать кое-что о доселе практически неизвестных планетах – достаточно вспомнить пример Венеры.

Максимальное расстояние, достигнутое зондом (несколько миллиардов километров), приблизительно в 10000 раз превышает расстояние до Луны (400000 км), куда смог добраться сам человек. Когда будет закончено исследование Солнечной системы, первой на очереди окажется ближайшая к нам звезда, Альфа Центавра, удаленная на 4,3 светового года, что несколько больше чем 40000 млрд. км. Любопытно, что это расстояние в свою очередь в 10000 раз превышает радиус Солнечной системы.

Сухие цифры на бумаге не могут создать представление об ужасающих размерах пустоты, отделяющей нас от Альфы. Самолет мог бы преодолеть такое расстояние за 4 млн. лет, а космическому кораблю с двигателем на химическом топливе потребовалось бы не менее 40000 лет; при этом надо учесть, что необходимое для путешествия количество горючего намного превосходит возможности современной мировой экономики.

Что же делать? Несмотря на почти безнадежный характер предприятия, уже рассмотрены различные варианты межзвездных путешествий, причем все они основаны на разумных предположениях о будущих возможностях науки и техники. Имеет смысл проанализировать некоторые из этих проектов, чтобы составить представление об их грандиозности.

Проект «Орион»

Первый серьезный проект, в настоящее время отвергнутый, имел кодовое название «Орион». На первом этапе предполагалось создание космического корабля на ядерном топливе для полетов внутри Солнечной системы (дадим ему название «Орион-1»). Он выглядел бы как большой небоскреб, покоящийся на прочной плите. Под плитой намечалось взорвать некоторое количество маленьких атомных бомб (кажется, около двухсот); при этом ударная волна от взрыва должна была вывести всю конструкцию на орбиту, оставив за собой огромное радиоактивное облако.

Расчеты позволяли надеяться на возможность запуска свыше 100000 тонн полезного веса при затратах, значительно меньших стоимости самого космического корабля.

После завоевания Солнечной системы с помощью транспортных кораблей такого типа предполагалось собрать «Орион-2» прямо в межпланетном пространстве, используя тот же принцип, что и раньше, но уже с королевским размахом. Вместо обычных атомных предполагалось использовать сотни тысяч водородных бомб, для того чтобы подтолкнуть корабль в сторону Альфы со скоростью в одну сотую скорости света (3000 км/с); даже в таком случае путешествие должно занять по крайней мере 400...500 лет. Из тех, кто отправился бы в путь с Земли, никто бы не долетел живым до Альфы; таким образом, речь шла об участии

многих поколений в установлении «моста» между звездами. Можно, однако, с уверенностью утверждать, что осуществление проекта «Орион-1» вызвало бы ожесточенное и, пожалуй, оправданное, сопротивление не только экологов. С другой стороны, я бы с удовольствием воспринял запуск «Ориона-2»: огромные количества накопленных в арсеналах адских машин были бы разрушены на границах Солнечной системы, далеко от нашего собственного дома.

Другие варианты запуска космического корабля

Вместо закатившегося «Ориона» возникли новые проекты. В одном из них предлагается создать корабль в виде сферического бака, содержащего огромное количество замороженного дейтерия (тяжелого водорода), причем дейтерий должен быть извлечен, как с изрядной долей оптимизма считают авторы проекта, из атмосферы Юпитера. Внутри большого термоядерного реактора дейтерий будет превращаться в гелий, за счет чего корабль получит нужный импульс. Хотя скорость перемещения этого корабля должна быть выше, чем скорость «Ориона-2», в намечаемом путешествии придется принять участие также не одному поколению астронавтов. Проблема, однако, в том, что никто еще не сумел построить такой реактор; и хотя многие считают, что успех в этом деле придет через десяток лет, все равно все мероприятие кажется безнадежным.

Рожденные исключительно богатым воображением следующие идеи, возможно, как раз и приведут к созданию космического корабля будущего. Все межзвездное пространство заполнено водородом, и поэтому кое-кто высказывает мнение, что именно этот водород стоит использовать в качестве горючего, вместо того чтобы брать его с собой из дому. Следовательно, если бы удалось сообщить кораблю достаточно высокую начальную скорость, то, находясь в пути, он мог бы собирать необходимое количество газа для непрерывного пополнения запасов горючего и достигнуть, таким образом, скорости, близкой к скорости света. Путешествие могло бы быть выполнено всего одним поколением астронавтов. Разворот корабля был бы осуществлен с помощью галактического магнитного поля, как остроумно предлагается в одном из недавних проектов. Другая идея, которую стоило бы объединить с предыдущей, предусматривает создание на астероидах мощнейших лазеров, которые должны превращать солнечную энергию в сверхинтенсивные узко направленные лучи света. Свет «дул» бы в громадный, диаметром в сотни километров, «парус» корабля, сделанный из тончайшего алюминированного майлара (лавсана). Давление излучения обеспечило бы необходимый импульс при отправлении в сторону необъятного межзвездного пространства. В этом случае мы также имеем дело с разумным подходом к возможностям современной развивающейся технологии, и речь вовсе не идет о реализации проекта в обозримом будущем.

Что увидели бы астронавты?

Итак, вообразим, что честолюбие, стремление к славе, некоторое отсутствие здравого смысла или, более скромно, стремление к неизведанному заставили кого-то отважиться на рискованное и небывалое путешествие, и вот оно началось. Что же увидели бы астронавты? При увеличении скорости космического корабля релятивистские эффекты все больше давали бы себя знать, становясь все значительнее по мере приближения к роковому пределу 300000 км/с, к скорости света. Такого рода эффекты связаны между собой, и рассматривать их надо как целое.

На больших расстояниях от Солнечной системы Солнце будет выглядеть как очень яркая звезда, интенсивность свечения которой быстро падает с увеличением расстояния. При этом два явления начнут проявляться в виде прекрасного зрелища. О первом из них, «эффекте Доплера», можно составить представление, прислушиваясь к гудку проходящего поезда. Звук гудка становится выше по мере приближения поезда к нам (увеличивается частота) и ниже – при удалении его (частота падает). Что касается света, то этот эффект воспринимается как смещение цвета в сторону синего, когда источник приближается, и к красному, когда удаляется. Свет от Солнца и от ближайших звезд будет постепенно приобретать все более красный цвет; при достижении определенной скорости перемещения корабля весь свет от звезд уже перейдет в область инфракрасного излучения, становясь невидимым. Напротив, свет Альфы, как и всех звезд «по курсу» космического корабля, будет смещаться в сторону синего цвета, чтобы в конце концов тоже исчезнуть, но в ультрафиолетовой области. Останется полоса разноцветных промежуточных звезд, для которых эффект Доплера мал и непостоянен. Эта полоса будет непрерывно перемещаться вперед из-за второго явления, абберации света. Представим себе, что мы попали в сильный ливень и побежали под укрытие. Капли дождя при этом приобретают относительно нас горизонтальную составляющую скорости, из-за чего у нас создается впечатление, что источник дождя находится впереди, а не вверху над нами. По этой же причине при движении с релятивистской скоростью астронавтам покажется, что свет звезд приходит от источников, смещенных вперед относительно корабля. Звезды не будут видны с кормы: их изображения переместятся к носу корабля. Описанный эффект вполне реален; свыше столетия его наблюдают астрономы при исследовании движения Земли вокруг Солнца. При

движении со скоростью, равной 90% скорости света, что представляет собой предел, к которому, возможно, позволит приблизиться техника будущего, звездная панорама станет неузнаваемой, превратившись в маленькое светящееся гало по курсу корабля с сильными следами помех, вызванных межзвездным газом на пути света.

Течение времени

Относительность проявится поразительным образом при вычислении времени полета и пройденного расстояния. Такие расчеты выполняются по-разному для жителей Земли и для астронавтов. Для простоты примем расстояние до Альфы в точности равным четырем световым годам, а скорость космического корабля постоянной и равной 240000 км/с, т.е. четырем пятым скорости света. Людям на Земле покажется, что путешествие туда и обратно займет всего десять лет, значит, астронавты придут на Альфу через пять лет. Оттуда они пошлют сообщение, которое дойдет до Земли через четыре года, т.е. спустя девять лет после начала путешествия и как раз за год до прибытия астронавтов обратно на Землю.

Чтобы понять, как воспринимают путешествие астронавты, надо учесть замедление времени, приводящее к нарушению синхронности часов на Земле и на космическом корабле, и уменьшение расстояний; оба явления чисто релятивистские. Теория (да и лабораторные эксперименты) предсказывают, что с точки зрения астронавтов весь путь будет короче на две пятых, т.е. будет равен 2,4 светового года, и, следовательно, время в пути уменьшится до шести лет.

Таким образом, время путешествия для тех, кто в пути, отличается от времени, измеряемого оставшимися на Земле. Речь идет не о какой-то фантазии в духе Азимова; уже в 1971 г. описанный эффект получил прямое подтверждение на Земле в опытах, в которых время, показанное часами на борту самолета, сравнивалось с показаниями часов, оставшихся на Земле в Американской морской обсерватории.

Проследим еще раз более внимательно, как путешествуют часы в нашем воображаемом случае. Пока корабль удаляется со скоростью в четыре пятых скорости света, два сигнала, посланные с Земли с интервалом в одну секунду, достигнут корабль, разделенные уже тремя секундами; по соображениям симметрии верно и обратное. Следовательно, три года потребуются космонавтам, чтобы принять сигналы, посылаемые с Земли в течение девяти лет, а при возвращении на Землю соотношение в точности обратное, и три года сожмутся в один год. Но давайте посмотрим на вещи с точки зрения астронавтов на космическом корабле. Предположим, что Земля посылает сигнал один раз в год. Сообщение, посланное в конце первого года, придет на корабль тогда, когда на нем уже прошло три, т.е. по прибытии на Альфу. Оставшиеся девять земных лет сожмутся в три года обратного пути корабля, так что всего окажется шесть, как мы и говорили.

Мы видим, что игра с временной синхронизацией тесно связана с тем, что сжимается длина пройденного пути. Отметим, что множитель три, используемый в наших рассуждениях, на самом деле является следствием двух причин: замедления движущихся часов, а также того, что при удалении корабля каждый последующий сигнал вынужден пройти больший путь и затратить больше времени, чтобы достичь адресата.

Такого рода умственная гимнастика поставит в затруднительное положение большинство наших читателей, в чем можно, пожалуй, признаться, да и физику она покажется неудобной. Что же делать в этих случаях? Нужно сесть за изучение математического аппарата, что потребует на начальном этапе значительных усилий, которые, однако, будут щедро вознаграждены ощущением красоты и легкости выполнения расчетов. Этот математический аппарат (тензорный анализ) в настоящее время преподается в наших университетах и не представляет особых трудностей: в упрощенном виде его вполне можно было бы преподавать и в средних школах. Но по причинам, вдаваться в которые мы здесь не будем, этот язык, как и многие другие научные языки, едва ли найдет себе место (во всяком случае, еще длительное время) в общечеловеческой культуре.

Глава 2. Астрофизика и Солнечная система

1. Образование Солнечной системы

Наша Галактика содержит около 100 млрд. звезд, а всего галактик, которые в принципе наблюдаемы, примерно 10 млрд. Почему же тогда надо тратить время на выяснение подробностей рождения Солнца? Оно представляет собой посредственную, ничем не примечательную звезду, появившуюся около 4,6 млрд. лет назад (можно даже назвать его возраст средним). Солнце старше Плеяд, возраст которых несколько десятков миллионов лет, но заведомо моложе красных гигантов, населяющих шаровые скопления (их возраст 14 млрд. лет).

Дело в том, что Солнце до сих пор остается единственной известной науке звездой, на одной из планет которой существует жизнь. Поэтому чрезвычайно интересно исследовать механизм возникновения

Солнечной системы. Может оказаться, что планеты образуются, как правило, при рождении какой-нибудь звезды. В этом случае заметно увеличилась бы вероятность обнаружить жизнь еще где-нибудь во Вселенной. Такая возможность представляет большой интерес, причем не только с научной точки зрения.

Теории прошлого

Первая теория образования Солнечной системы, предложенная в 1644 г. Декартом, имеет заметное сходство с теорией, признанной в настоящее время. По представлениям Декарта, Солнечная система образовалась из первичной туманности, имевшей форму диска и состоявшей из газа и пыли (монистическая теория). В 1745 г. Бюффон предложил дуалистическую теорию; согласно его версии, вещество, из которого образованы планеты, было отторгнуто от Солнца какой-то слишком близко проходившей большой кометой или другой звездой.

Наиболее известными монистическими теориями стали теории Лапласа и Канта. Трудности, с которыми встретились в конце 19 в. монистические теории, способствовали успеху дуалистических, однако развитие истории снова вернуло нас к монистической теории. Такие колебания вполне понятны, поскольку в распоряжении исследователей было очень уж мало данных: распределение расстояний до планет, подчиненное определенному закону (закон Боде), знание того, что планеты движутся вокруг Солнца в одну сторону, да еще некоторые теоретические соображения (на которых мы не будем останавливаться), касающиеся углового момента Солнечной системы.

Если бы Бюффон оказался прав, то появление такой планеты, как наша, было бы событием чрезвычайно редким, связанным с другим столь же редким событием, как сближение двух звезд, а вероятность найти жизнь где-нибудь во Вселенной стала бы ничтожно малой. Такая перспектива вызвала бы разочарование не только у читателей научной фантастики.

Рождение Солнца

Более многочисленны и надежны экспериментальные данные о Солнечной системе, полученные в послевоенные годы. Методы, которыми были исследованы метеориты и поверхность Луны, нельзя было бы даже представить во времена Лапласа.

Речь идет о веществе, которое образовалось на самой ранней стадии жизни Солнечной системы или даже было частью первичной туманности.

Исследования послевоенных лет привели к некоторому прояснению нашего происхождения. Мы уже рассказывали выше о «большом взрыве», в результате которого в далекую эпоху, примерно 15...20 млрд. лет назад, родилась Вселенная. Спустя миллиард лет после «большого взрыва» из смеси водорода и гелия, заполнявших все пространство, началось образование галактик. Первые звезды, образовавшиеся в те времена, все еще видны в шаровых скоплениях и в центрах галактик. Вслед за ними образовались спиральные рукава.

Наиболее массивные звезды, сформировавшиеся в самом начале, прошли очень быструю эволюцию, при которой водород превращался в более тяжелые элементы (в том числе углерод и кислород), а вновь образованное вещество выбрасывалось в окружающее пространство. Такие превращения и сейчас происходят в термоядерных реакциях, поставляющих всю энергию, излучаемую звездами.

Этот «пепел» в свою очередь подвергался локальному сжатию, приводящему к рождению новых звезд, и цикл повторялся. Солнце представляет собой звезду второго или третьего поколения. Согласно Клейтону, сжатие, в результате которого образовалось Солнце, было вызвано сверхновой, которая, взрываясь, сообщила движение межзвездному веществу и, как метла, толкала его впереди себя; так происходило до тех пор, пока за счет силы тяготения не сформировалось стабильное облако, продолжавшее сжиматься, превращая собственную энергию сжатия в тепло.

Вся эта масса начала нагреваться, и за очень короткое время (десяток миллионов лет) температура внутри облака достигла 10...15 млн. градусов. К этому времени термоядерные реакции шли полным ходом и процесс сжатия закончился. Принято считать, что именно в этот «момент», от четырех до шести миллиардов лет назад, и родилось Солнце.

Образование планет

В ту эпоху Солнце было окружено обширным облаком пыли, состоявшей из песчинок графита (как в карандаше) и кремния (тончайший песок), а также, возможно, окислов железа, смерзшихся вместе с аммиаком, метаном и другими углеводородами. Столкновения этих песчинок привели к образованию камешков побольше, диаметром до нескольких сантиметров, рассеянных по колоссальному комплексу колец вокруг Солнца.

Вычисления, проделанные Голдрайхом, показали, что эти кольца были нестабильны из-за взаимного притяжения, и поэтому камешки на ранних стадиях объединились в большие тела типа астероидов,

заполняющих пространство между Марсом и Юпитером и имеющих в диаметре несколько километров. В свою очередь нестабильной оказалась и система астероидов. Большие массы объединились в группы, которые наконец коллапсировали, образуя планеты.

Вначале Солнечная система состояла из планет и множества астероидов, еще не объединенных вместе и распределенных по очень сложным орбитам. Три миллиарда лет назад падение астероида на планету должно было быть явлением довольно частым; те небесные тела Солнечной системы, которые практически лишены атмосферы (как Луна, Марс и Меркурий), до сих пор несут на себе следы этих ужасных бомбардировок. На Земле воздействие атмосферы уничтожило следы таких событий, и только недавно образованные кратеры еще видны (один такой кратер имеется в штате Аризона).

Наиболее близкие к Солнцу планеты сформировались в более горячей области, нежели дальние планеты; более того, вскоре после своего рождения Солнце пережило период большой активности, когда его масса, уносимая горячим солнечным ветром, уменьшалась с огромной скоростью (всего за несколько миллионов лет масса Солнца уменьшилась вдвое).

Речь здесь идет о «стадии Тельца», получившей название по имени звезды, видимой в созвездии Тельца. Раскаленное дыхание Солнца очищало межпланетное пространство от газов и остаточной пыли, перемещая их в сторону внешнего пространства. Действительно, около дальних планет (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) и теперь встречаются в изобилии различные элементы, в то время как около внутренних каменных планет их сравнительно мало. А вот единого мнения насчет происхождения комет до сих пор нет.

Мы рассказали в общих чертах о рождении Солнечной системы. Можно надеяться, что непрерывно поступающие новые экспериментальные данные и прогресс в теории дадут ответ на некоторые еще не ясные вопросы. На это, возможно, потребуется несколько десятков лет.

2. Введение в астрофизику

Тот факт, что Солнце – это обыкновенная звезда, единственная примечательная черта которой состоит в том, что, находясь так близко от Земли, она нам светит, нас греет и вообще создает возможность существования жизни на нашей планете, судя по всему, общеизвестен. Однако если бы мы стали расспрашивать «человека с улицы», пытаясь выяснить какие-либо подробности о Солнце или других звездах, то его ответы на наши вопросы оказались бы значительно менее уверенными. Сейчас мы попытаемся предоставить ему некоторую информацию, для чего бегло очертим панораму наших знаний о звездах.

Состав Солнца

По существу, звезды – это газовые шары, вещество которых удерживается вместе гравитационными силами притяжения. Звездный газ в основном состоит из водорода (70...75%) и гелия, а также содержит следы более тяжелых элементов (неон, углерод, кислород). Звезды посылают нам свет и тепло, и, чтобы не дать им погаснуть в очень короткое время, необходим источник, непрерывно пополняющий запасы звездной энергии. В прошлом столетии имела хождение теория, согласно которой это происходит за счет энергии, высвобождающейся в процессе непрерывного сжатия звезды, вызванного ее собственным гравитационным полем; шар, таким образом, сжимается под действием собственного веса и нагревается, подобно воздуху в велосипедном насосе.

По этой теории энергии Солнца хватило бы примерно на 20 млн. лет; этот кажущийся большим отрезок времени – мелочь в сравнении с возрастом Солнечной системы (5 млрд. лет), известным нам из исследования радиоактивных камней. Теорию оставили. Тем не менее она содержит долю истины. Как мы уже говорили, Солнце действительно обязано своим рождением сжатию громадного газового облака, состоявшего, вероятно, из тончайшего песка из углерода и кремния; и уж наверняка описанный нами механизм действовал в течение первых 10...15 млн. лет, нагревая и сжимая первоначальное облако, превращая его в шар с современными размерами. В какой-то момент, однако, температура внутри облака достигла 10...15 млн. градусов и зажглись термоядерные реакции, которые начали медленно превращать водород в гелий и другие элементы; именно эти реакции и служат фактическим источником наблюдаемой солнечной энергии. В результате термоядерных реакций около 0,7% полной массы Солнца исчезает, чтобы превратиться в энергию согласно знаменитой формуле $E = mc^2$.

На самом деле такие превращения происходят только в ограниченной центральной области Солнца. Начавшиеся термоядерные реакции сразу же прекратили всякое дальнейшее сжатие Солнца, и оно обрело стабильные размеры и светимость, которые практически не менялись в течение нескольких миллиардов лет. Дальнейшее сжатие привело бы к увеличению плотности и температуры в центральной области, что ускорило процесс сжигания водорода, а выделившееся дополнительно тепло привело бы снова к расширению Солнца до прежних размеров.

Эволюция Солнца

Такому положению все же наступит конец, когда весь водород будет превращен в гелий. Теоретически солнечного горючего при современных темпах его сгорания хватит по крайней мере на 100 млрд. лет. Но существуют обстоятельства, которые заметно уменьшают это время; так, водород, сгорая фактически только в центральной части Солнца, исчезнет в ней уже через 5...6 млрд. лет, гораздо раньше, чем во внешней оболочке.

Когда прекратится сгорание горючего в центральной части Солнца, она снова начнет сжиматься, быстро нагреваясь до все возрастающих температур, а тепло, передаваемое при этом внешней оболочке, приведет к ее расширению до размеров, чудовищных по сравнению с современными: Солнце расширится настолько, что поглотит Меркурий и будет разбазаривать горючее в сто раз быстрее, чем в настоящее время. Оно вступит в стадию «красного гиганта»; жизнь на Земле исчезнет или найдет пристанище на внешних планетах.

Мы, конечно, будем заранее поставлены в известность о таком событии, поскольку переход к новой стадии займет примерно 100...200 млн. лет. Нетрудно предвидеть, что будет дальше. Когда температура центральной части Солнца достигнет 100 млн. градусов, начнет сгорать и гелий, превращаясь в тяжелые элементы, и Солнце вступит в стадию сложных циклов сжатия и расширения, не поддающихся исследованию даже с помощью современных вычислительных машин. Почти наверняка Солнце на последней стадии потеряет внешнюю оболочку, которую унесут с собой в пространство раскаленные ветры, и оно останется в виде центрального ядра, имеющего невероятно большую плотность и размеры, как у Земли. Пройдет еще несколько миллиардов лет, и Солнце остынет, превратившись в «белый карлик».

Магнитное поле

Итак, Солнце представляет собой водородную бомбу непрерывного действия, правда бомбу доброжелательную, скрытую под газовым покрывалом толщиной свыше полумиллиона километров. На солнечной поверхности непрерывно бушуют мощные раскаленные ураганы. Очень интересно, что магнитное поле Солнца играет значительную роль в происходящих там явлениях. На Земле магнитное поле подчиняется строгому порядку, оно указывает направление с Юга на Север и служит мореплавателям при работе с компасом.

На Солнце же силовые линии магнитного поля сильно изогнуты и постоянно переплетаются под действием солнечных бурь. Если вещество нагреть настолько, что атомы будут терять свои электроны при сильных столкновениях друг с другом, то оно окажется в состоянии, которое физики называют «плазмой». Магнитное поле в этом случае играет роль бутылки, из которой плазма не может выйти, разве что в исключительных случаях. На Солнце магнитное поле увлекает за собой плазму и перемешивает ее, как половником в кастрюле. Временами случается, что области солнечного вещества, в которых магнитное поле сильно, выходят на поверхность Солнца, и плазма в них охлаждается, излучая наружу тепло, в то время как горячая плазма из соседних областей проникнуть к ней не может. Такие более холодные зоны выглядят темными пятнами на поверхности Солнца; это и есть знаменитые солнечные пятна, открытые Галилеем (хотя почти наверняка еще раньше их видел иезуит Шейнер из Ингольштадта).

Бывает также, что магнитные силовые линии так закручиваются, что могут «сломаться», передавая всю свою энергию плазме, которая тогда бурно нагревается и ускоряется до скоростей в несколько сотен километров в секунду; в таких случаях наблюдаются так называемые «солнечные вспышки». О Солнце нам известно уже очень многое, но не все. Так, количество солнечных пятен меняется, следуя одиннадцатилетнему циклу, но вместе с тем наблюдаются и вековые изменения, которые каким-то таинственным образом влияют на климат Земли.

Классификация звезд

Что можно сказать о других звездах? Астрофизики давно уже поняли, что самым существенным параметром, характеризующим динамику звезды, является ее масса, т.е. общее количество вещества, из которого она состоит. Увеличение массы вдвое влечет за собой увеличение светимости звезды примерно в тридцать раз (как в случае Сириуса); во столько же раз уменьшится светимость, если массу уменьшить наполовину. Сириус пожирает горючее соответственно в пятнадцать раз быстрее, чем Солнце; мы имеем здесь дело со «звездой-пустозвоном», которая хоть и светит ярко, но растеряет свой пыл гораздо раньше Солнца.

Существуют, однако, звезды (например, звезда Барнарда) с массой, в десять раз меньшей массы Солнца, и светимостью, меньшей в сто тысяч раз. Встречаются также объекты, которые светятся столь слабо, что их невозможно отличить от такой планеты, как Юпитер. Кстати, многие астрофизики считают Юпитер погасшей звездой (его масса в тысячу раз меньше солнечной и в триста раз больше массы Земли). С другой стороны, существуют и звезды с массой, в десятки раз превышающей массу Солнца, которые

могут светить, как миллион Солнц. Речь идет об объектах, чрезвычайно нестабильных, жизнь которых (продолжительностью в несколько миллионов лет), как правило, заканчивается серией катастроф.

Эти сверхзвезды развиваются очень быстро, поэтому требуется не так много времени, чтобы в центральной области началось превращение водорода и гелия в более тяжелые элементы. Когда в этих превращениях начинается образование железа, становится невозможным дальнейшее выделение ядерной энергии, и снова начинается гравитационный коллапс. При определенных условиях такой коллапс происходит внезапно, в течение доли секунды, с точки зрения сопутствующего наблюдателя. Звезда «схлопывается», сжимаясь до чрезвычайно малого объема. Тепло, выделяемое при сжатии, передается внешней оболочке, и она, нагретая до миллиардов градусов, выбрасывается в пространство со скоростью в тысячи километров в секунду. Описанное нами явление известно под названием «вспышка сверхновой» и представляет собой одно из наиболее грандиозных и страшных событий на космической сцене (существуют также звезды, именуемые просто «новыми»; они также свидетели внушительных катастрофических явлений, но меркнут при сравнении со сверхновыми).

Самые близкие к нам звезды

Итак, мы знаем, что существует огромное разнообразие звезд, и приятно сознавать, что наблюдения в общих чертах достаточно хорошо подтверждают теоретические предсказания (за исключением некоторых «родимых пятен», на которых мы остановимся ниже). Посмотрев вокруг себя, мы увидим около сотни звезд, близких к Солнцу, расстояния до которых можно определить непосредственно методом треугольника. Более того, можно также определить их массы (используя закон притяжения Ньютона), если мы имеем дело, как часто случается, с системой из двух или более объектов. Расстояния до этих звезд меняются от 4,3 светового года, как в случае Альфы Центавра, до сотни световых лет. Большинство звезд расположено, естественно, на далеких расстояниях, и именно это обстоятельство делает их трудно наблюдаемыми. Изучая соседей Солнца, мы ничего примечательного в них (за исключением Сириуса и Альфы) не обнаруживаем; часто (в 60% случаев) встречаются системы, состоящие из нескольких объектов. Этот факт наводит на мысль, что и наличие планет у звезды, возможно, не исключение, а правило; впрочем, отличить молодую планету от маленькой звезды не всегда удается. Во всяком случае, не существует прямых наблюдений какой-нибудь темной планеты, вращающейся вокруг близкой к нам звезды; по всей вероятности, создание орбитальных телескопов предоставит интересующую нас информацию, можно надеяться, положительную.

Вернемся теперь к трудностям современных теорий о звездах. Помимо тепла, сгорание термоядерного горючего должно привести к появлению большого количества нейтрино. Как мы уже говорили, нейтрино – неуловимые частицы, способные проходить, не взаимодействуя, через огромную толщу вещества. В эксперименте, проводимом в настоящее время в Южной Дакоте (США), для обнаружения нейтрино используется большой бак, наполненный жидкостью, в которой нейтрино вызывают характерные реакции. Бак помещен в глубокую шахту. В жидкости, однако, было поглощено гораздо меньше нейтрино, чем ожидалось, и до сих пор нет удовлетворительного объяснения этого факта.

Согласно Понтекорво, может оказаться, что нейтрино превращаются в другие нерегистрируемые аппаратурой частицы во время длительного путешествия от Солнца до Земли. Некоторые ученые считают, что центральное ядро Солнца, где сжигается горючее, на самом деле имеет меньшие размеры, а его температура ниже, чем принято думать; существует также теория, согласно которой активность Солнца периодически оказывается значительно ниже обычной, хотя при этом внешний наблюдатель не регистрирует заметных изменений в его светимости.

Почти наверняка эти проблемы будут решены уже в ближайшие годы. Будущее Солнце представляет не только чисто академический интерес, хотя стадия «красного гиганта» наступит совсем не скоро и не может вызвать тревогу. Дело в том, что даже небольшие изменения светимости Солнца и частоты появления солнечных пятен могут привести к опасным нарушениям равновесия климата на Земле, и такие изменения необходимо уметь предсказывать.

чтобы избежать катастроф в будущем. Об этих вещах известно пока ничтожно мало, и ученым потребуется приложить большие усилия в ближайшие десятилетия для решения возникающих проблем.

3. Сверхновые

«Звезда-гостья», появившаяся в 1054 г.

В 1054 г. в созвездии Тельца была обнаружена ярчайшая звезда, превосходившая по светимости как звезды с постоянными характеристиками, так и планеты. Когда ее яркость достигла максимума, она была видна даже среди бела дня. К счастью для нас, прилежные китайские астрономы той эпохи подробно, обращая внимание на всевозможные детали, описали увиденное ими явление. Спустя несколько месяцев от

новой звезды не осталось и следа (по крайней мере видимого невооруженным глазом). Китайцы нарекли ее звездой-гостьей, как называли любые скоротечные небесные явления (например, появление кометы).

Звезда-гостя китайцев не была кометой. В 1731 г. один астроном-любитель в Шотландии впервые увидел странную туманность в области созвездия Тельца. Через несколько десятков лет французский астроном Мессье составил свой знаменитый каталог, который начинался как раз с этого странного объекта (а именно, M1), называемого Крабовидной туманностью (по-английски Crab Nebula). Здесь я не буду останавливаться на истории научных поисков, которые привели к пониманию того, что Крабовидная туманность – это остаток после гигантского взрыва, воспринятого китайцами как появление той самой знаменитой «звезды-гостьи».

Эволюция звезд

Эти интересные и впечатляющие природные объекты все же заслуживают более подробного обсуждения и описания. Свою энергию звезда получает, постепенно превращая водород в более тяжелые элементы (гелий, углерод, кислород, неон и другие) с помощью сложной цепочки термоядерных реакций, происходящих в ее недрах. В действительности только 0,7% общей массы превращается в энергию согласно знаменитой формуле Эйнштейна $E = mc^2$. Превращения прекращаются, когда заканчивается синтез железа, инертного вещества в «атомном пепле».

Надо иметь в виду, что звезда с большой массой сжигает свое горючее намного быстрее, чем легкая звезда. Так, например, масса Сириуса вдвое превышает массу Солнца, но его светимость в 28 раз больше. Запасы горючего Сириуса будут исчерпаны гораздо раньше, чем у Солнца. Такие простые оценки на самом деле являются слишком упрощенными, так как в конце своей жизни звезда переживает периоды неустойчивости, когда расход горючего стремительно возрастает, и ее жизнь укорачивается. В случае Солнца такая стадия наступит примерно через 5 млрд. лет.

Если бы вдруг, как по волшебству, прекратились реакции, происходящие в недрах обычной звезды, нам пришлось бы ждать несколько миллионов лет, чтобы заметить какое-то изменение. Самый парадоксальный эффект состоял бы в том, что уменьшились размеры звезды и одновременно увеличилась ее температура. Дело в том, что объем, занимаемый звездой, определяется ее внутренним теплом, при этом давление газа и излучения компенсирует стремление к гравитационному коллапсу. Погасив звезду, мы уберем единственное препятствие, сдерживающее гравитационную силу, и звезда сожмется под действием собственного веса. Но всем известно, что при сжатии газ нагревается (мы все когда-нибудь пользовались велосипедным насосом); то же явление происходит и в звездах.

Гравитационный коллапс

Как мы уже говорили, железо представляет собой инертное по отношению к ядерным реакциям вещество. Когда в центральной области массивной звезды аккумулируется достаточное количество железа, термоядерные реакции прекращаются и начинается коллапс. Вначале этот процесс протекает очень медленно и проявляется в постепенном повышении температуры. При определенной температуре становится возможным превращение протон-электронной пары в пару нейтрон – нейтрино. Нейтрино, едва появившись, покидают звезду, унося энергию. В дальнейшем коллапс ускоряется и температура увеличивается до тех пор, пока железо не начнет распадаться, поглощая дальше энергию центрального ядра звезды. Конечным итогом этих процессов (температура уже достигает нескольких миллиардов градусов, происходит «нейтронизация» вещества) будет превращение почти всех электронов и протонов в нейтроны и нейтрино.

За несколько секунд центральное ядро коллапсирует в сильно сжатое состояние (нейтронную звезду, или пульсар), в котором плотность может достигать значений, в десятки триллионов раз превышающих плотность воды. Ложка, сделанная из такого сверхплотного материала, содержала бы столько же вещества, сколько его в целой горе. Вся масса Солнца занимала бы объем, сравнимый с размерами города. В зависимости от размеров и структуры звезды процесс сжатия либо прекратится на стадии нейтронной звезды, либо пойдет дальше – до стадии черной дыры.

При образовании пульсара энергия сжатия будет передаваться внешней оболочке, фактически еще не начавшей падать в направлении к центру (к этому времени пройдет всего лишь несколько секунд). Эта оболочка нагреется до температуры в миллиарды градусов и будет отброшена прочь большим давлением излучения (а также потоком нейтрино) со скоростью в тысячи километров в секунду. Внешний наблюдатель увидел бы почти мгновенное превращение звезды в огненный шар, стремительно расширяющийся и уничтожающий все на своем пути.

Когда яркость ее достигает максимума, светимость звезды может превысить первоначальную в миллиарды раз. Крабовидная туманность как раз состоит из остатков такой взорвавшейся звезды, которые

продолжают распространяться в пространстве и занимают в настоящее время область диаметром в несколько световых лет.

Пульсары

В центре этой туманности все еще можно различить звездочку, которая считается пульсаром, оставшимся после взрыва. Вблизи она выглядела бы как почти идеальный шар, состоящий из сверхплотного вещества (нейтронной жидкости) и вращающийся вокруг своей оси с очень высокой скоростью (свыше 30 оборотов в секунду). Имеется запретное на самой звезде сильнейшее магнитное поле (в триллионы раз больше магнитного поля Земли), которое увлекается вращением пульсара. Это поле, взаимодействуя с плазмой, окружающей звезду, передает ей энергию вращения, что приводит к внушительным эффектам. Вся система ведет себя практически как вращающаяся фара, излучающая свет со всеми длинами волн, от радиоволн до рентгеновских лучей. Наблюдателю на Земле кажется, что пульсар излучает очень короткие вспышки света, разделенные одной тридцатой секунды (период обращения), отчего произошло само название «пульсар». Впервые пульсар наблюдал Хьюиш в 1967 г.

Локальные эффекты, связанные со сверхновыми

Возможно ли, что Солнце вдруг решит эффектно прекратить свое существование, вспыхнув сверхновой и навсегда вычеркнув нас из Вселенной? Речь идет об очень маловероятном событии, хотя и возможном. Действительно, для синтеза железа и обеспечения больших гравитационных сил, необходимых для коллапса, требуется звезда большой массы. Если бы близко расположенная звезда, например Сириус, взорвалась как сверхновая, мы наверняка почувствовали бы какие-то последствия, скорее всего отрицательные. Взрыв привел бы к тому, что в окружающее пространство было выброшено большое количество космических лучей; при этом наблюдались бы интенсивные радиопомехи. Кроме того, сверхновая сделала бы наши ночи светлыми, как день, что вызвало бы на Земле экологические нарушения.

Спектакль получился бы увлекательным, но не лишенным опасностей. В пределах Галактики в среднем одна сверхновая взрывается раз в триста лет. Астрономы всегда на чеку в надежде увидеть объекты такого типа в начальной, самой интересной, стадии. Но можно без особого труда обнаружить сверхновые в соседних галактиках; речь идет о событии не столь уж редком. В этом случае сверхновые можно использовать также и для грубой оценки расстояния до галактики, в которой они находятся.

Наконец, существуют указания на то, что часть вещества, из которого состоит Солнечная система, осталась от взрыва сверхновой в далеком прошлом. Уже говорилось, что внешняя оболочка звезды, будучи отброшена прочь с очень высокой скоростью, ведет себя как «космическая метла», сметая все остатки вещества (межзвездная пыль и газ), встречающиеся на ее пути. Временами это вещество сжимается настолько, что наступает гравитационная неустойчивость, и оно конденсируется в новые звезды. Похоже, что наше Солнце родилось именно таким образом. Итак, мы участвуем в непрерывном циклическом процессе взаимного превращения звезд и межзвездного вещества, постоянно обогащающегося и меняющегося под влиянием взрывов сверхновых.

Только тому, кто наблюдает небо поверхностно, с помощью несовершенных приборов, Вселенная может показаться местом тихим и спокойным. На самом деле мы должны быть благодарны судьбе за то, что живем рядом со скромной третьестепенной звездой, спокойным солнышком без претензий, находящимся на периферии, но зато надежным на ближайшие пять миллиардов лет. А там посмотрим.

4. Юпитер и Сатурн

«Вояджер» выполнил задание и теперь удаляется от системы Сатурна; примерно через десять лет он, возможно, пошлет нам первые снимки Урана, снятые с близкого расстояния. Астрономам есть чем заняться во время долгого ожидания этих изображений. Космический зонд уже сделал тысячи превосходных фотографий Сатурна в добавление к изображениям Юпитера.

Что же узнали мы о Солнечной системе с помощью этой и многих других автоматических станций? Практически вся планетология была перестроена на основе огромного количества нового материала, по сравнению с которым информация, полученная раньше с помощью телескопов, имеет в основном историческую ценность.

Состав Юпитера

Начнем с Юпитера, колосса Солнечной системы. Галилей первым увидел диск и четыре главных спутника, проведя знаменитую серию наблюдений, открывающих эпоху современной астрономии. Спустя три столетия «Вояджер» подвел нас к самой планете и дал возможность разглядеть детали ее поверхности. Диаметр Юпитера составляет около 144000 км, что примерно в 12 раз больше диаметра Земли, а его масса

всего лишь в 300 раз превышает земную; если бы Юпитер имел такую же плотность, как и Земля, то, учитывая их размеры, его масса должна была бы превышать земную больше чем в 1500 раз. В действительности Юпитер состоит из более легкого вещества: из смеси водорода, гелия и некоторых примесей, включающих метан, аммиак, сернистые и другие химические соединения. Сила тяготения на поверхности Юпитера примерно в два с половиной раза больше, чем на Земле: мальчик, весящий 40 кг, на Юпитере весил бы целый центнер. По этой причине вес верхних слоев сжимает оболочку Юпитера, постепенно доводя вещество до очень большой плотности по мере перехода в глубь планеты. Юпитер почти весь состоит из вещества с газо-жидкой структурой, и только в самом центре, возможно, имеется небольшое каменистое ядро, скрытое под громадной оболочкой. Само это ядро окутано водородом, который, будучи сжат до невообразимой плотности, превращается в твердое металлическое вещество, проводящее электричество и тепло.

Несостоявшаяся звезда

Юпитер образовался при сжатии той же газовой туманности, из которой образовалось Солнце, и по своему химическому составу он тоже схож с Солнцем. При этом масса Юпитера едва достигает одной тысячной массы Солнца, что очень много по земным масштабам, но недостаточно, чтобы зажечь термоядерные реакции, которые вырабатывают тепло в недрах Солнца. Так что здесь мы имеем дело с «несостоявшейся звездой». В этом смысле Солнечная система включает в себя двойную звезду (или даже тройную, если считать Сатурн). Процесс сжатия Юпитера еще не закончен, и тепло, вырабатываемое этим непрерывным гравитационным сжатием вещества Юпитера, излучается атмосферой планеты в инфракрасной области спектра, невидимое для человеческого глаза, но вполне заметное для астрономических приборов.

Воспринимаемый в инфракрасном свете, Юпитер светится сам и излучает в три раза больше энергии, чем получает от Солнца.

Конвективные движения

Температура планеты увеличивается по мере продвижения внутрь, достигая нескольких десятков тысяч градусов в самом центре. Такие высокие температуры вызывают конвективные движения в оболочке планеты, движения, напоминающие то, что мы видим в кастрюле, поставленной на огонь: глубинные массы жидкости горячее и легче и поэтому перемещаются к поверхности. Достигнув ее, они излучают тепло во внешнее пространство, охлаждаются и опускаются вниз; цикл начинается снова.

В телескоп видно, что поверхность Юпитера разделена на горизонтальные полосы (параллельные экватору). Темные полосы чередуются со светлыми. Считается, что в пределах светлых полос горячее вещество выходит на поверхность, в то время как на темных полосах охлажденное вещество начинает свой спуск вниз. Данные, полученные «Вояджером», показали, что эта теория при всех ее достоинствах должна быть усовершенствована с учетом поразительных структур, усложняющих и украшающих атмосферу Юпитера гирляндами, вихрями и громадными омутами всевозможных расцветок. Еще Кассини видел на поверхности планеты знаменитое Красное Пятно, названное так, как говорит Азимов, из-за яркого красновато-оранжевого цвета. С близкого расстояния видно, что это красное пятно не единственное и что имеется еще одно, намного меньшее. Разумеется, большое пятно остается самым знаменитым: все-таки оно было обнаружено лет триста назад. Рядом с этими пятнами расположено множество других разноцветных пятен, имеющих, по-видимому, разные физические и химические составы.

«Вояджер» сфотографировал атмосферу Юпитера через множество цветных светофильтров; затем были восстановлены трехцветные изображения, но в «смещенном цвете», так, чтобы инфракрасный «цвет» был представлен как красный; другие цвета были изменены тоже. На этих фотографиях различные по химическому составу компоненты атмосферы окрашены в разные цвета, что дает возможность ученым разобраться в сложных метеорологических условиях Юпитера.

Красное Пятно

Исследования показали, что Красное Пятно – это большой вихрь, занимающий площадь, в три-четыре раза превышающую всю площадь поверхности Земли. На некоторых «ускоренных» кинокадрах прекрасно видно вихревое движение пятна, проглатывающего более мелкие пятна и возвращающего их назад невредимыми, как после круга на карусели. Похоже, что Красное Пятно возвышается как гигантский сплюснутый купол над средним уровнем окружающей его поверхности Юпитера. Полосатая структура этой поверхности объясняется быстрым вращением планеты, совершающей один оборот немногим меньше чем за десять часов; в полярных зонах влияние вращения уменьшается, и вместо полос видно множество мелких пятен, где горячее вещество появляется из глубин.

Сильнейшее магнитное поле Юпитера захватывает излучение Солнца, создавая смертельный поток заряженных частиц, подобный радиационным поясам Земли и опасный даже для электронного оборудования; такой поток почти мгновенно привел бы к смерти любой формы земной жизни.

Автоматический зонд зафиксировал полярные сияния и ослепительные молнии, которые постоянно меняли очертания в неистовом бурлении атмосферы Юпитера, где бушевали беспрерывно сменявшие друг друга ураганные ветры со скоростями до 400 км/ч.

Спутники Юпитера

«Вояджер» передал на Землю не только снимки самой планеты, но и превосходные фотографии ее спутников. Из основных спутников (галилеевы спутники) ближайшим к планете является Ио, на котором обнаружено целых восемь действующих вулканов; кора Ио, таким образом, находится в состоянии высокой активности. По этой причине на нем нет следов бомбардировок метеоритами, какие видны на Луне, Марсе и почти на всех небесных телах Солнечной системы, обладающих твердой корой. Напомним, что, согласно общепринятой теории, лунные кратеры представляют собой результат таких интенсивных бомбардировок, происходивших около трех миллиардов лет назад при зарождении Солнечной системы и с меньшей интенсивностью продолжающихся вплоть до наших дней. На Ио непрерывные потоки извергающейся лавы стерли все следы прошлого, оставив покрывало красного цвета, состоящее, по всей вероятности, из серы и различных сернистых соединений; местность неуютная еще из-за высокого уровня опасного излучения поясов, подобных радиационным поясам Земли. Открытие действующих вулканов явилось полным сюрпризом для планетологов и одним из наиболее значительных результатов, полученных «Вояджером».

Что касается состава остальных спутников Юпитера, то, по всей видимости, они содержат больше льда и меньше тяжелых каменных материалов, причем это обогащение льдом и уменьшение доли тяжелых веществ тем заметнее, чем дальше от планеты находится спутник. Число достоверно известных спутников Юпитера превышает дюжину; в большинстве своем это ледяные шары около сотни километров в диаметре, едва видимые с Земли. Подсчет их числа, проведенный аккуратно, без спешки с помощью стационарного искусственного спутника Юпитера, наверняка выявил бы сотни более мелких спутников. Таким образом, система Юпитера напоминает Солнечную систему в миниатюре.

Столь же плодотворным оказался визит космического зонда к Сатурну. Как и ожидалось, поверхности Сатурна и Юпитера схожи по характеристикам; судя по всему, наличие желтоватых лент, расположенных вдоль экваторов, связано с присутствием метана.

В астрологических руководствах можно прочесть, что Сатурн приносит несчастье, его влияние всегда связано с большим горем. В книгах по астрономии написано в более прозаическом стиле, что среднее расстояние от Солнца до этой планеты составляет 1427 млн. км (почти в десять раз больше, чем расстояние до Земли) и что один оборот вокруг Солнца она совершает примерно за 30 лет.

Открытие колец Сатурна

В 1610 г. Галилей, разглядывая Сатурн с помощью телескопа, заметил, что планета выглядит довольно странно, и решил, что он видит два тела, сопровождающие основную планету и расположенные по обеим сторонам от нее. О своем открытии он сообщил анаграммой "Smaisnermiclmbpobtalevmibvneuvgttavirus", над которой долго ломал голову Кеплер, тщетно пытаясь найти для нее решение. Наконец, Галилей разъяснил смысл написанного: "Altissimum planetam tergeminum observavi" («Я обнаружил, что самая дальняя планета тройная»). Несколько лет спустя из-за относительного движения Сатурна и Земли кольца оказались повернутыми в профиль и поэтому стали практически невидимыми. Галилей решил, что он ошибся и прекратил заниматься Сатурном. Он умер, так и не узнав о существовании колец.

Кольца были открыты Гюйгенсом в 1659 г., о чем он объявил следующим образом: "aaaaa, cccc, d, eeeee, g, h, iiiiii, llll, mm, nnnnnnnnnn, oooo, pp, q, rr, s, tttt, uuuu", что означало: "Anulo cingitur tenui, nusquam coerente, ad eclipticam inclinato" («Она окружена легким кольцом, нигде не касающимся светила и наклоненным относительно эклиптики»).

Мы избавим читателя от других анаграмм и подробного рассказа об истории этих исследований. Сатурн представляет собой громадную планету, имеющую в диаметре 119300 км, чуть меньше Юпитера. Система колец имеет внешний диаметр свыше 240000 км и с течением времени изменялась.

Состав и структура колец Сатурна

Шотландец Дж.К. Максвелл был первым, кто в 1850 г. в работе, ознаменовавшей собой начало его блестящей научной карьеры, серьезным образом поставил вопрос о природе колец Сатурна. С помощью неопровержимых доводов, основанных на законах небесной механики, он показал, что кольца не могут быть ни твердыми, ни жидкими. Оставалась гипотеза пыли, т.е. множества вращающихся по орбите вокруг планеты астероидов, столь мелких и многочисленных, что они воспринимаются как непрерывное кольцо.

Спустя столетие модель пыли все еще считается справедливой, и оценки среднего диаметра «пылинок» дают значение порядка одного метра. Кроме того, похоже, что они состоят из льда. Из-за возмущений, вызываемых спутниками Мимасом и Энцеладом, некоторые орбиты нестабильны и остаются поэтому незаполненными. По этой причине пыль собирается в сложную систему концентрических колец, щели между которыми, вероятно, не превышают одного километра; для сравнения можно сказать, что толщина листа бумаги окажется равной 25 м, если пропорционально увеличить все размеры на Земле до размеров на Сатурне.

Теория Голдрайха и Тремайна, которая должна была объяснить детали структуры колец, оказалась (после получения данных от зонда) слишком упрощенной и должна быть теперь пересмотрена, хотя она в принципе остается справедливой, и на ее основе уже получены некоторые важные результаты. Недавние снимки, переданные зондом, свидетельствуют, что структура системы колец очень сложна; возможно, некоторые эффекты объяснимы только на основании предположения о существовании других спутников Сатурна, помимо дюжины уже обнаруженных.

Эта теория, как и всякая другая, основана на законе всемирного тяготения Ньютона и, по сути, представляет собой сложный пример приложения этого закона.

Существует ли жизнь на газовых гигантах Солнечной системы?

В интересной статье Солпитера и Сагана, опубликованной в серьезнейшем периодическом издании "The Astrophysical Journal", обсуждается одна такая возможность. Эти два автора считают, что Юпитер мог бы быть местом обитания гигантских упорядоченных организмов, вроде огромных шаров, наполненных водородом и плавающих в атмосфере планеты. Эти организмы могли бы питаться веществами, которые выносятся из недр планеты мощными восходящими потоками, упомянутыми нами выше. Не исключены случаи каннибализма. Красное Пятно могло бы оказаться идеальным местом для обитания этих организмов, что в свою очередь могло бы объяснить его окраску. Здесь мы имеем захватывающую рабочую гипотезу, для подтверждения или – будем реалистически смотреть на вещи – полного провала которой потребуются многие годы. Аналогичные соображения могут быть предложены и для Сатурна. Высказывалась мысль, что и в нагретой вулканами атмосфере Титана, самого большого спутника Сатурна, могла бы существовать жизнь, однако «Вояджер» обнаружил, что атмосфера Титана холодна и вряд ли может этому способствовать. Будущее, однако, всегда может приготовить нам какой-нибудь сюрприз.

5. Человек на Луне

Высадка первого человека на Луне 21 июля 1969 г. осуществила мечту нескольких поколений читателей Жюль Верна. Это памятное событие привлекло внимание всей мировой общественности и приковало к экранам телевизоров миллионы людей. Жюль Верн предугадал общий ход событий, но он не мог предвидеть ни грандиозный размах и огромную стоимость дела, предпринятого НАСА, ни фантастическую сложность всей аппаратуры, управляющей запуском и полетом. Если бы он поглубже изучил физику, то, возможно, избежал бы некоторых занимательных ошибок, из-за которых ряд его идей следует, скорее, отнести к археологии научной фантастики.

Итак, что же обнаружили астронавты на Луне и каков итог всего предприятия? Многие вещи уже заранее были известны специалистам; но, поскольку спектакль был хорошо разыгран, широкую публику они смогли удивить. Было известно, что Луна почти лишена атмосферы; количество газа, оставленного на Луне двигателями спускаемого модуля, сравнимо с тем его количеством, которое там уже было.

Отсутствие атмосферы на Луне объясняется слабостью ее гравитационного поля, которое в шесть раз меньше земного; вторая космическая скорость на Луне равна примерно 1 км/с – пуля, пущенная из ружья, наверняка сумела бы преодолеть лунное притяжение. Молекулы любого газа находятся в непрерывном тепловом движении; скорость лунной молекулы неизбежно, а вовсе не случайно оказалась бы больше космической, так что молекула исчезла бы в пространстве. Возможно, Луна все же имела атмосферу в эпоху зарождения Солнечной системы, но к настоящему времени на ней остались лишь ничтожные следы тяжелых газов.

На Земле любой камень содержит какие-то следы воды; эту воду всегда можно извлечь, нагревая камень. Огромные лунные просторы, покрытые пылью с редкими вкраплениями камней, лишились всяких следов воды за миллиарды лет пребывания в пустом пространстве. Эта пыль выглядит очень темной; будучи исследована уже на Земле, она оказалась совершенно бесплодной, похожей по составу на земные базальты. Лунная поверхность примечательна разве что присутствием некоторого количества титана – металла будущего. Имеющиеся данные, таким образом, не могут вызвать энтузиазма у людей, мечтавших об использовании богатых залежей лунных минералов.

Будем все же осторожны. На Земле полезные ископаемые сконцентрированы в зонах с ограниченной площадью, и, чтобы их извлечь, необходима большая исследовательская работа на местности. Если бы мы

вдруг спустились на Землю и стали изучать минералы, подобранные в дюжине разных мест, то перспектива их использования тоже не показалась бы нам заманчивой.

Разглядываемая с Луны Земля кажется неподвижно подвешенной в небе и имеет фазу, дополнительную по отношению к фазе Луны, разглядываемой в то же время с Земли. Солнце освещает Луну непрерывно две недели подряд, затем следуют две недели темноты; сложенные вместе, они как раз и составляют лунный месячный цикл. Лунная почва, исключительно горячая днем, становится ледяной ночью. Так что Луна представляет собой чрезвычайно неприветливое место, и только ценой огромных и непрерывных материальных затрат можно было бы создать на ней базу, где астронавты имели бы минимум комфорта. Картины, предложенные зрителям авторами фильма «Космическая Одиссея», очень далеки от реальности, и, возможно, мы никогда и не увидим такого, если не сможем найти выхода из наступившего энергетического кризиса.

Какую пользу принесли человечеству экспедиции на Луну? Всего несколько лет прошло после их осуществления, но чувство разочарования и потеря интереса у большинства людей очевидны. Наверно, все ожидали чего-то похожего на открытие Америки: исследована новая территория, и, однажды преодоленные, ее границы должны стать открытыми для всех желающих. Но Луна, увы, не Клондайк, и массовая доставка людей на нее еще весьма далека от реализации, даже несмотря на то, что введение в строй космического корабля многократного использования должно значительно снизить стоимость таких полетов.

Научных данных о нашем спутнике накоплено огромное количество, и только часть их обработана. Можно надеяться, что на основе этих данных будет получен более точный ответ на вопрос о происхождении Солнечной системы. Действительно, на Луне, поверхности которой не коснулись ни разрушительное действие атмосферы, ни катаклизмы, как, например, те, которые происходят в земной коре, сохранились древнейшие камни (их возраст 4 млрд. лет), своим происхождением восходящие ко времени рождения самой Солнечной системы.

По-видимому, еще десяток лет потребуется, чтобы на основе данных о Луне и непрерывно поступающих данных о других планетах сделать какие-то определенные заключения о происхождении Солнечной системы. Тогда мы сможем точнее узнать, было ли образование нашей системы событием из ряда вон выходящим или, как мы предполагаем, речь идет об образовании рядовой планетной системы, каких много во Вселенной.

В последнем случае увеличилась бы вероятность найти где-то во Вселенной жизнь, возможно, и разумную. Ответы на фундаментальные вопросы о нашем далеком прошлом не имеют денежного эквивалента, их нельзя оценивать только с точки зрения экономической.

Лунные приключения нельзя считать растратой общественных средств (хотя бы и «дяди Сэма»). Они способствовали развитию космической технологии, а множество совершенных ошибок позволило осознать опасности, поджидающие нас в космосе; наступило время, когда спутник, метеорологический или связи, щедро вознаграждает нас за средства, затраченные на его создание.

Заглядывая в ближайшее будущее, нужно иметь в виду, что запасы полезных ископаемых на Земле подходят к концу; если бы весь мир потреблял свинец с такой же интенсивностью, как Соединенные Штаты, его хватило бы всего на три года; такие же цифры характерны для положения почти со всеми минералами, а о нефти лучше и не вспоминать.

Увеличение численности населения земного шара так же, как и развитие мировой экономики современными темпами в течение ближайших нескольких десятков лет, просто немыслимо; более того, кризис природных ресурсов уже стучится в нашу дверь, хотя – вот парадокс! – в Солнечной системе почти наверняка полным-полно полезных ископаемых, пусть и не на Луне. Маленькие внешние спутники Юпитера представляют собой не что иное, как большие шары, состоящие из смержшихся камней, льда и углеводородов. Кроме того, возможно, что многие из астероидов, расположенных между Юпитером и Марсом, состоят из сплава железа и никеля, подобного центральному ядру Земли. Одного такого осколка диаметром в километр хватило бы для удовлетворения наших нужд на столетия вперед. По этой причине исследование остальных небесных тел Солнечной системы и изучение механизма ее образования приобретает не только академический интерес, но может дать вполне определенную практическую выгоду в будущем.

Подобные рассуждения справедливы и для Солнца, по разным причинам еще недостаточно изученного. Например, минимальное изменение его светимости может привести к различным изменениям земного климата и к потрясениям, катастрофические последствия которых можно было бы ограничить, зная о них заранее. И в этой области ожидаются в высшей степени интересные результаты, связанные с использованием космического «челнока» для вывода телескопа на орбиту.

Итак, наши приключения только начинаются, и, даже если мы еще далеки от создания космических колоний типа описанных американским драматургом О'Нилом, виды Юпитера, посланные на Землю космическими зондами и поразившие наше воображение, заставляют задуматься над исключительностью нашего времени и над значением всех уже имеющихся данных для будущего человечества.

Глава 3. О современной физике

1. Вводные замечания

Предмет физики

Что такое материя? В настоящее время не существует исчерпывающего ответа на этот вопрос, да и разъяснить его непосвященным на нескольких страницах было бы невозможно. Что еще хуже, в своих рассуждениях мы могли бы дойти до принципиальной невозможности определить абсолютным образом сущность материи.

Здесь я могу дать ответы только на какие-то частные вопросы, которые прольют свет на уже имеющиеся результаты исследований и перспективы развития физики, да рассказать об усилиях, которые предпринимаются для достижения синтеза наших знаний. По определению, физика – это наука о материи (веществе), и она призвана заниматься выработкой теорий, которые сжато и ясно объясняли бы все более расширяющийся спектр явлений; она должна, кроме того, подвергать эти теории экспериментальной проверке, прежде чем дать им путевку в жизнь.

Итак, вещество наблюдают и изучают, выделяя какие-то его физические свойства и определяя, как со временем меняется его состояние. Для физика само вещество отождествляется с совокупностью всех наблюдаемых свойств, но такой жесткий подход ослабляется нашей неспособностью определять и изучать все возможные характеристики вещества.

Среди наиболее важных свойств вещества имеются такие, которые меняются непрерывно и смысл которых интуитивно особенно очевиден. Таковы, например, положение, скорость и энергия материального тела. Существуют другие, дискретные, свойства, они называются квантовыми: мы можем сделать выбор между серой и кислородом, но промежуточной возможности просто нет.

Положение тела задается в трехмерном пространстве, и это отражает очевидный эмпирический факт; согласно теории относительности, время следует рассматривать как четвертое измерение. Таким образом, сценой, или ареной, для физики служит четырехмерное пространство-время. Вполне возможно, что в не слишком далеком будущем структура пространства-времени сможет быть понята на основе постулатов более простых и фундаментальных, чем современные.

Идеальная теория должна быть способна вычислять силы, с которыми действуют друг на друга разные составные части вещества. Согласно жесткой детерминистской схеме, или схеме Лапласа, зная распределение вещества в какой-то заданный момент времени, мы должны иметь возможность с помощью уравнений движения предсказать это распределение в последующие моменты времени. По разным причинам такую программу осуществить не удастся. Мы не можем задать состояние вещества полностью: чтобы определить состояние некоторого объема, потребовался бы устрашающе длинный список всех отдельных атомов в химических соединениях, а составить такой список мы заведомо не в состоянии. Судя по современному уровню научных исследований, в ближайшие годы почти наверняка будут выявлены какие-то новые, еще не открытые свойства материи, так что физические теории всегда имеют дело с неполным набором экспериментальных данных; хорошо известным примером этого является ньютоновская теория тяготения.

Пределы применимости физики Ньютона

«Мир» Ньютона состоял из материальных тел, единственной характеристикой которых, если не считать положения, скорости и энергии, служила масса m . Для измерения m к телу прикладывают известную силу F , затем измеряют ускорение тела a и вычисляют массу, используя знаменитую формулу $F = ma$; таким образом, величина m служит мерой инерции тела, его сопротивления движению под действием заданной силы. Чудесным образом оказалось, что силу притяжения между ньютоновскими телами можно определить, зная только их массы и расстояния между ними. Этого достаточно также для описания их движения.

Такая идеализация допустима, если тела не рассматриваются на слишком близком расстоянии: так, Земля не является точкой, она имеет океаны, твердую кору и жидкие недра. На ней рождаются приливы и отливы, которые хоть и незначительно, но все же влияют на движение Земли вокруг Солнца, да и на движение Луны. Насколько существенны такие эффекты, зависит от состава земного вещества и его атомной структуры. Но силы, действующие между атомами, не гравитационной природы, и поэтому здесь теории Ньютона недостаточно.

Вплоть до 1900 г. свойства материи и наличие исключительного разнообразия форм ее проявления объясняли химическим взаимодействием примерно ста элементов, соответствующих различным атомам. Как свидетельствует огромное количество химических опытов, речь идет о феноменологическом описании,

основанном на понятии валентности и вполне подходящем с точки зрения многих технических приложений.

Открытие электрона в конце прошлого столетия положило конец мифу о неделимости атома. Согласно модели Бора – Резерфорда, атом подобен миниатюрной солнечной системе, состоящей из положительно заряженного тяжелого ядра, вокруг которого вращаются электроны, заряженные отрицательно. В целом атом нейтрален.

Электромагнитные и ядерные силы

Таким образом, мы столкнулись с силой нового типа – электромагнитной силой. В нашем введении мы не будем рассказывать об историческом пути, приведшем в 1859 г. к открытию Дж.К. Максвеллом уравнений электромагнитного поля, открытию, стоящему в одном ряду с теорией Ньютона. Согласно теории Максвелла, материальное тело характеризуется еще одним свойством – электрическим зарядом. Зная его, мы знаем, как тело взаимодействует с электрическим и магнитным полями, а также как оно их создает. Противоположные заряды притягиваются, а заряды одинакового знака отталкиваются. Итак, существуют положительные и отрицательные заряды; в теории же Ньютона массы всегда положительны и всегда притягиваются.

Внутри вещества положительные заряды (ядра) стремятся к отрицательным (электронам), чтобы вместе создать нейтральное вещество (атомы); оставленное в покое вещество стремится «спрятать» электромагнитное поле. С другой стороны, большому количеству вещества, собранного вместе, свойственны большая масса и, следовательно, гравитационное притяжение. Поэтому, даже если электрическая сила взаимодействия электрона и ядра несравнимо больше сил тяготения, в конце концов начинают доминировать именно последние, когда в игру вступают большие количества вещества.

Атом Бора вмиг свел химию к одной из глав физики, а классификацию элементов – к классификации атомных ядер. В свою очередь оказалось, что ядра состоят из нуклонов, положительных (протонов) и нейтральных (нейтронов), с массой примерно в две тысячи раз большей массы электрона. Но, как сказал Фейнман, успех физической теории определяется не столько задачами, которые с ее помощью решаются, сколько значением новых задач, возникающих на ее основе.

Гравитоны, фотоны, и пионы

Одна из первых задач касалась природы сил, за счет которых нуклоны держатся вместе внутри ядра; вскоре оказалось, что они примерно в сто раз больше электрических и что на расстояниях в несколько ферми (1 ферми равен одной триллионной доле миллиметра) их действие прекращается. Другой вопрос касался самой природы электромагнитного поля. Выдающимся достижением Максвелла было осознание того, что световые волны наряду с радиоволнами, рентгеновским и γ -излучением представляют собой очень быстрые колебания электромагнитного поля; все они имеют одну и ту же природу и различаются только частотой.

Свет, падая на металлическую поверхность, может поглотиться и передать свою энергию электрону, который при этом вылетает из атома (фотоэлектрический эффект). В своей первой работе, опубликованной в 1905 г., Эйнштейн объяснил некоторые расхождения наблюдавшегося фотоэлектрического эффекта с теорией Максвелла. В сущности, Эйнштейн выдвинул гипотезу о существовании новой частицы – кванта света, или фотона, гипотезу, принявшую окончательный вид к концу 1923 г.

Энергия электромагнитной волны не может передаваться непрерывно, а выдается, согласно закону Планка, пакетами (квантами) определенной величины, пропорциональной частоте. Частота радиоволн столь низка, и соответствующие пакеты столь малы, что создается впечатление непрерывного излучения. В случае же γ -излучения фотон ведет себя как настоящая частица, как «атом света». Фотон имеет двойственную природу: он одновременно представляет собой и частицу, и волну. Даже гравитационные волны, предсказываемые общей теорией относительности, должны быть квантованы: им соответствует гравитон.

Итак, существовали частицы «нормальные», к которым относились электрон и протон, и «частицы-волны», как фотон и гравитон. Из необходимости обойти эту неприятную асимметрию и родилась квантовая механика, постулирующая двойственную природу волна – частица всей материи. Электроны и протоны также представляют собой волны; их волновая природа проявляется только тогда, когда они находятся в ограниченной области пространства (как в атомах или ядрах) или в столкновениях со столь же мелкими препятствиями. Таким образом, стирается грань между материей (веществом) и светом, свет выступает как особая форма материи.

Исключительно сложная теория, называемая квантовой электродинамикой и развитая в послевоенные годы Фейнманом, Томонагой, Швингером и Дайсоном, дает очень точное описание сложного пространственно-временного пинг-понга, происходящего в мире, состоящем из электрических зарядов и

фотонов. Заряды обмениваются фотонами; эти последние ответственны за электромагнитные силы взаимодействия самих зарядов. В сущности, отменяется ньютоновское мгновенное действие на расстоянии, фотоны выступают как «носители» силы или, если угодно, как электромагнитный «клей». Точно таким же образом гравитационным клеем служит гравитон. Ядерные силы можно представить как результат обмена л-мезонами, предсказанными Юкавой и названными пионами. Пионы образуют семейство из трех частиц (положительной, нейтральной и отрицательной), которые все рождаются в ядерных реакциях на наших ускорителях.

Дуализм волна – частица

Квантовая механика глубоко затронула наши представления об атоме и вообще любой системе, где частицы, объединенные чрезвычайно большой силой, находятся в очень маленьком объеме. Нельзя и дальше считать частицы материальными точками, которые перемещаются по орбитам, строго определяемым их взаимным притяжением. Наоборот, электрон в атоме Бора рассматривается как волна, а поле притяжения – как линза, которая ее загибает и заставляет вращаться вокруг ядра. Атом становится резонансной полостью для электронных волн. Именно такое сравнение должно навести на мысль, что внутри атома возможны не любые колебания. Еще во времена Пифагора знали, что натянутая струна или труба органа могут колебаться, издавая звук только определенной основной частоты и ее гармоник.

Итак, электрон может обращаться вокруг ядра только в соответствии с дискретной (прерывистой) последовательностью возможных частот колебаний, каждая из которых соответствует в общем одной классической орбите старой планетарной модели. Говорят о «квантовании» орбит и их энергии. Самый низкий тон, испускаемый струной, соответствует колебанию без каких-либо узлов (если бы в середине струны был узел, то струна выглядела бы как две струны половинной длины, колеблющиеся с удвоенной частотой). В атоме также существует состояние минимальной энергии (основное состояние), соответствующее наименьшей из орбит, которые электрон может описывать вокруг ядра. Если передать атому достаточно энергии, то он «возбуждается» и электрон перемещается в состояние с более высокой энергией, чтобы затем снова вернуться в основное состояние, излучив при этом разность энергий в виде фотона (света). Этому свету присущ определенный цвет, зависящий от происшедшего перехода и представляющий собой «автограф» атома. Так, красный цвет рекламных огней выдает присутствие неона. Свет звезд, опровергая злополучное предсказание Конта, раскрывает их химический состав.

Даже интуитивно мы чувствуем, что волна – это ускользающий объект, который «не дается в руки». Гейзенберг сформулировал соотношение неопределенности, придающее конкретный смысл этому интуитивному представлению. Мы уже говорили, что положение и скорость частицы – характеристики, поддающиеся измерению. Квантовая механика, напротив, определяет границы, за которыми нельзя одновременно измерять такие величины; если бы мы знали точное местонахождение электрона, то о его скорости (на самом деле надо говорить о количестве движения, равном скорости, умноженной на массу) нам ничего бы не было известно.

Наоборот, знание скорости влечет за собой незнание положения. Следовательно, несмотря на сильное притяжение к ядру, электрон никогда на него не падает. Если бы мы попытались поместить электрон внутрь ядра (которое чрезвычайно малых размеров), то он тут же обрел бы столь большую скорость, что немедленно оставил это ядро. Таким образом, квантовая механика объясняет стабильность атомов, ядер и всех других составных систем.

Перейдем теперь в мир частиц элементарных, или считающихся таковыми. До сих пор мы говорили об электронах, нуклонах, пионах, фотонах и гравитонах. Между тем нейтрон нестабилен и примерно за двадцать минут распадается на протон, электрон и нейтрино, похожее на нейтральный электрон, который необычайно сложно наблюдать (нейтрино не чувствует ни электрических сил, ни ядерных). При распаде пиона рождаются мюон и нейтрино, а при распаде мюона образуются электрон и еще два нейтрино; мюон (л-мезон) представляет собой что-то вроде тяжелого брата электрона. К 1980 г. перечень известных частиц с их описанием занимал целую книгу и уже мог составить конкуренцию таблицам химических элементов. По этой причине ученые ведут поиски субъядерных структур, которые бы свели эту сложную феноменологию к достаточно простым повторяющимся схемам, как в свое время сделал Бор. Сейчас получает все большее признание схема, основанная на кварках и глюонах (квантовая хромодинамика).

Здесь мы прервем общее введение, чтобы глубже познакомиться с некоторыми основополагающими представлениями, едва упомянутыми нами ранее. После рассмотрения наиболее элементарных с современной точки зрения составных частей вещества мы перейдем к обсуждению явлений, происходящих в макроскопическом масштабе, таких, например, как сверхтекучесть, чтобы показать, как на этом уровне проявляются наиболее скрытые свойства материи.

2. Квантование

Понятие «кванта» лежит в основе всей атомной физики, и его использование оказало на развитие техники гораздо более сильное влияние, чем теория относительности. По этой причине мне кажется уместным затратить некоторое время, чтобы пояснить природу квантовой механики.

Механика

Пространство (кантовское трехмерное) заполнено материей, движущейся под действием сил, вызванных самой же материей. Цель физики состоит в выявлении природы этих сил и в том, чтобы представить их в лаконичном математическом виде. «Объяснить» силы – значит вывести для них математическое выражение из малого числа аксиом, причем эти выражения должны быть достаточно простыми и применимы к множеству разнообразных явлений. Так, общая теория относительности объясняет гравитационные силы, а уравнения Максвелла объясняют силы электромагнитные и природу света.

Задача механики – математически описать движения материальных тел, если известны силы, действующие на эти тела. Ньютон открыл закон всемирного тяготения, но, что еще важнее, он также ввел формализм классической механики, и это позволило ему вычислить с хорошей точностью орбиты планет и их взаимодействие. К концу девятнадцатого столетия понятие механики претерпело значительные изменения по сравнению с исходным представлением Ньютона; Лагранж сформулировал принцип действия, Максвелл вывел уравнения электромагнитного поля, используя определенную аналогию с механикой сплошных сред.

Модель атома Резерфорда

Мы уже обсуждали кризис, приведший к созданию релятивистской механики. Столь же интересен и кризис, который привел к возникновению понятия «кванта». Благодаря опытам Томсона к началу нашего века стало ясно, что электроны представляют собой отрицательно заряженные частицы, являющиеся составной частью атома. Электрический ток является не чем иным, как упорядоченным движением электронов вдоль металлического провода; в этом смысле электрон – это «квант» электричества.

Исходя из такой информации, Резерфорд предложил планетарную модель атома. Согласно этой модели, электроны вращаются, как планеты, вокруг центрального положительно заряженного ядра, которое притягивает их подобно Солнцу. Напомним, что заряды разных знаков притягиваются, а одинаковых – отталкиваются. Такая аналогия между атомом и Солнечной системой сразу же захватила воображение большинства людей. Она действительно очень полезна, поскольку позволяет создать зрительный образ атома, а также избежать длинных разъяснений. Тем не менее пользоваться аналогией можно только до определенного предела. Электроны все строго одинаковы и энергично отталкиваются друг от друга, поскольку справедлив принцип Паули, запрещающий им занимать одно и то же состояние. Ни одно из этих свойств не имеет планетарного аналога.

Основной недостаток модели Резерфорда следует из природы электрических зарядов. Заряд, на который не действуют силы, движется равномерно и прямолинейно. Если же на него действует магнитное поле или притяжение какого-нибудь атомного ядра, то траектория заряда будет искривлена; из теории Максвелла следует, что такой заряд должен испускать электромагнитные волны и что при этом он потеряет часть своей энергии. На самом деле единственный способ произвести электромагнитные волны состоит как раз в том, чтобы «потрясти» какие-нибудь заряды, что очень просто сделать, если речь идет об электронах.

Итак, электрон внутри атома должен излучать, т.е. непрерывно терять энергию, так что в конце концов он должен будет упасть на ядро. Таким образом, атом Резерфорда оказывается нестабильным и должен в своем развитии дойти до коллапса, излучив при этом вспышку света, что полностью противоречит наблюдаемому факту стабильности вещества. Эти трудности модели стали особенно ясны во время Сольвейского конгресса 1911 г. Как при чтении трудов конгресса, так и в личных беседах с Резерфордом датчанин Нильс Бор имел возможность осознать недостатки и достоинства такой модели. По какой же причине орбиты электронов оказываются стабильными?

Модель Бора

Историк науки Томан Кун воспроизвел во всех подробностях различные этапы изнурительного труда Бора вплоть до 1913 г., в котором модель атома водорода приняла окончательный вид. Бор ограничился рассмотрением атома водорода, так как он очень прост (единственный электрон вращается вокруг одного протона) и поддается математическому анализу, поскольку электронные орбиты подчиняются законам

Кеплера. Существует бесконечное число возможных орбит, характеризующихся средним расстоянием от ядра и сплюснутостью, или эксцентриситетом.

Каким же образом можно получить эмпирическую информацию об этих орбитах? Ответ на этот вопрос дает спектроскопия. Если в стеклянной трубке, наполненной разреженным газом, возбудить электрический разряд, то мы вызовем излучение света (этим объясняется, например, свечение рекламных огней). Разговаривая со спектроскопистом из Копенгагена Хансенем, Бор понял, что существуют очень простые эмпирические правила, управляющие излучением световых волн газообразным водородом.

Свет и радиоволны имеют одинаковую природу, но частота света намного выше, чем у радиоволн (примерно в миллион раз). Атомы, оказывается, излучают свет вполне определенной частоты, как миниатюрные радиостанции, причем частота эта зависит от вида атома. В 1905 г. для объяснения фотоэлектрического эффекта Эйнштейн предположил, что световое излучение сконцентрировано в «пакетах» (квантах света, или фотонах), энергия которых пропорциональна частоте, в соответствии с соотношением Планка.

Таким образом, атом может излучать свет, теряя энергию дискретно, порциями, пропорциональными частоте. В модели Резерфорда падение электрона на ядро представляло непрерывный процесс, напоминающий спираль, по которой двигалась до конца своих дней станция «Скайлэб». Бор же постулировал (и это был очень смелый шаг), что электроны могут находиться только на некоторых определенных орбитах из бесконечного числа их, предсказываемого моделью. Тогда, перескакивая с одной орбиты на другую, электрон теряет вполне определенное количество энергии, в точности равное предсказанному эмпирическими формулами для излучения света.

Квантование орбит

Так Бор, определив правила для орбит, пришел к квантованию. Правила Бора для атома водорода выглядели очень просто. Трудности, возникшие при их распространении на другие атомы, потребовали для своего преодоления создания квантовой механики. Основное утверждение квантовой механики, в сущности, состоит в том, что электрон, как и любая другая материальная частица, живет еще и второй жизнью – жизнью волны (дуализм волна – частица). Формула Планка определяет связь между энергией частицы и ее частотой, если частица рассматривается как волна. Квантовая механика устанавливает полное соответствие между волновыми свойствами и свойствами частицы.

Обычно бывает (или бывало) трудно представить волновую природу электрона, которая проявляется, только когда длина волны оказывается большой в сравнении с препятствиями, встречающимися на его пути. Это как раз и происходит внутри атома, поэтому невозможно проследить за движением электрона, считая его воображаемым шариком в миниатюрной солнечной системе. Скорее нужно подходить к атому, как к аналогу звукового резонатора, как к странному музыкальному инструменту, в котором вместо звуковых волн мы имеем волны электронные. Именно такое сравнение дает возможность понять суть квантования орбит. Трубка органа может колебаться только на определенной частоте, зависящей от формы и длины трубки; то же происходит в случае струны рояля. Теперь нужно говорить не об электронных орбитах, потерявших смысл, а, скорее, о различных «модах», т.е. видах колебаний. Меняя моду, электрон излучает световую волну с характерной частотой, зависящей от конкретного перехода.

Применение идей Бора при рассмотрении более сложных атомов позволило надежно обосновать периодическую систему Менделеева и выяснить природу химической связи. Столь же важным оказалось открытие того, что дуализм волна – частица универсален и присущ всякой материи. Несколько замечаний, высказанных Эйнштейном на эту тему, позволили Шредингеру вывести знаменитое уравнение, описывающее движение этих волн материи.

Остается вопросом истории, какие же причины привели Эйнштейна (да и Шредингера) в стан противников новой физики, поднявшейся из пепла старой, в частности, именно благодаря им. Разумеется, и до сих пор существуют сомнения относительно правильной интерпретации квантовой механики. Большинство физиков придерживается интерпретации так называемой Копенгагенской школы. Все, включая самого Эйнштейна, признали выводы и формулы, которые следуют из этой интерпретации. Тем не менее вплоть до своей смерти в 1955 г. Эйнштейн считал квантовую механику несовершенной теорией, неопределенность которой представляет собой серьезный недостаток, частично закрывающий от нас истину.

3. Соотношение неопределенности

Одним из популярнейших персонажей комиксов 30-х годов, вне сомнения, был Брик Брайфорд (в итальянском варианте – Джорджо Вентура). В одном из своих наиболее известных похождениях он, уменьшенный дьявольской машиной, внедряется в монету стоимостью один цент, чтобы подробно исследовать атом меди. Атом представлен в виде планетарной системы в миниатюре; вокруг Солнца

вращаются планеты, населенные странными существами. Рассказик в картинках несомненно был навеян представлением об атоме Бора: вокруг ядра, исполняющего роль Солнца, вращаются электроны-планеты. На этом все сходство практически кончается. Ядро на самом деле не освещает систему (а если и освещает, то излучая γ -лучи), электроны в действительности все одинаковы и отталкиваются друг от друга при сближении; и что еще хуже, орбиты электронов практически заполняют весь атом, в то время как орбиты планет лежат в одной плоскости (называемой эклипстикой).

Представление о планетарной системе все же имеет несомненные заслуги в деле создания зрительных образов и популяризации чрезвычайно сложных понятий; временами бывает удобно воспользоваться несовершенными образами в качестве первого приближения, чтобы передать суть дела. С точки зрения дидактики открытие квантовой механики ухудшило положение, хотя и позволило нам глубже постичь некоторые странные свойства атомов.

Корпускулярная природа света

В своей первой работе 1905 г. Альберт Эйнштейн привлек корпускулярную теорию света для объяснения аномалий, наблюдавшихся в фотоэлектрическом эффекте: согласно этой теории, свет распространяется в виде пакетов («квантов» света, или «фотонов») вполне определенной энергии, пропорциональной частоте в соответствии с законом Планка.

В известном смысле лампа представляет собой «пулемет, стреляющий фотонами»; как мы уже говорили, энергия этих фотонов может меняться и зависит от цвета света; энергия синих квантов вдвое превышает энергию красных; кванты радиоволн исключительно маленькие, в то время как кванты γ -излучения громадны (на атомном уровне); в предельном случае космического излучения могли бы существовать кванты с энергией, сравнимой с энергией мяча для гольфа.

Наблюдение электронов

Предположим теперь, что нам захотелось увидеть движение электронов внутри атома так же, как с помощью телескопов мы наблюдаем движение планет. Поскольку ядро само не излучает и электроны не испускают собственного света, пришлось бы осветить атом извне, используя подходящий источник. Длина волны падающего света должна быть сравнимой с размерами наблюдаемых объектов; так, радар, работающий на метровых радиоволнах, не «увидит» мухи; по этой же причине обычный микроскоп не может помочь нам увидеть внутренность атома. Самый мелкий объект, наблюдаемый в обычном видимом свете, имеет размеры порядка тысячной доли миллиметра, а атом примерно в десять тысяч раз меньше; чтобы увидеть в атоме хоть что-нибудь, нужно освещать его рентгеновскими лучами. Кстати, первые успехи в понимании структуры атома были достигнуты как раз тогда, когда физики получили в свое распоряжение источник коротковолнового излучения. Частота увеличивается с уменьшением длины волны, длинные радиоволны (с длиной волны порядка 1 км) имеют низкую частоту (для указанной длины волны она составляет 300000 герц; 1 герц=1 цикл в секунду); частота волн видимого света доходит до $3 \cdot 10^{14}$ герц, что в миллиард раз больше.

Соотношение неопределенности

Как уже было сказано, энергия фотонов света намного больше энергии квантов радиоволн; в свою очередь энергия квантов рентгеновских лучей в десять или даже в сто тысяч раз больше энергии квантов световых. Чем меньше детали объектов, которые мы собираемся рассматривать, тем энергичнее должны быть используемые фотоны. Этот факт имеет странные последствия. В то время как свет от Солнца, даже интенсивный, практически не воздействует на движение планет и позволяет нам спокойно вести наблюдения, излучение рентгеновских микроскопов очень сильно влияет на движение исследуемых электронов, бомбардируя их фотонами высоких энергий. Действительно, электроны представляют собой частицы с очень маленькой массой, и их движение испытывает сильное возмущение при соударении с фотонами, используемыми для наблюдения; ведь чтобы точно определить положение электрона, необходимо использовать коротковолновые и высокочастотные рентгеновские лучи, т.е. фотоны очень высоких энергий. В результате проведенного наблюдения скорость электрона окажется чрезвычайно неопределенной величины, поскольку невозможно заранее предвидеть, сколько энергии он получит от фотона-наблюдателя.

Подобные рассуждения привели к появлению соотношения неопределенности Гейзенберга: согласно Гейзенбергу, невозможно одновременно определить и положение, и скорость электрона (да и любой другой частицы). Более того, бессмысленно даже представлять электрон как объект, которому можно приписать положение и скорость, определенные совершенно точно в одно и то же время; ограничения, которых мы коснулись, связаны вовсе не с плохой конструкцией микроскопа, но следуют из новых свойств, внутренне присущих материи. Эти свойства явились предметом длительных дебатов, не затихающих до сих пор.

Волновая формулировка квантовой механики

Трудности, возникающие при попытках объяснить квантовую механику непосвященным, довольно значительны; вероятно, лучше всего можно разъяснить суть вещей, исходя из ее волновой формулировки.

Движение электрона при этом уже не описывают, задавая последовательные положения в зависимости от времени, – электрон представляется в виде «мини-волны»; при таком подходе соотношение неопределенности автоматически входит составной частью в теорию.

Вообразим серию волн, набегающих на пологий берег; скорость этих волн вполне определенная, и ее можно вычислить, зная расстояние и время, разделяющие два последовательных гребня. Волна, однако, не особенно локализована, она занимает большое пространство. Электрон, скорость которого нам хорошо известна, в отличие от положения, которое мы знаем очень плохо, можно представить в виде волны такого типа.

В противоположность рассмотренному примеру можно представить себе бак с водой, подвешенный над поверхностью моря в точно определенном месте; бак открывается, и вода в последующие мгновения низвергается, создавая серию волн, которые разбегаются во все стороны с самыми различными скоростями. Электрон, локализованный в пространстве, характеризуется волновой функцией как раз такого типа.

Образ частицы в виде материального шарика, перемещающегося вдоль вполне определенной орбиты, является всего лишь зрительным приближением к более глубокой и скрытой истине, выражаемой квантовой механикой. Существует мнение, что открытие этой механики привело к революции в физике, сравнимой с переворотом в умах, вызванным принципом относительности. Квантовый образ атома прекрасно иллюстрирует это. В конце концов, можно считать электрон и шариком, лишь бы не пришлось в голову попытаться слишком точно локализовать его или пока ему по дороге не встретились слишком мелкие препятствия; в этих случаях заметной становится волновая природа электрона.

В модели Бора наиболее глубокие атомные орбиты страдают как раз от этих ограничений, они слишком близко подходят к ядру. Поэтому при их описании надо учитывать, что электрон является волной. Атом в значительной мере похож на странную резонансную полость, в которой вместо звуковых волн находятся электронные.

Еще во времена Пифагора было известно, что струна, барабан, труба органа и тому подобные предметы могут издавать звук, т.е. колебаться, только с определенными частотами, зависящими от формы предмета. Чем длиннее струна или труба органа, тем медленнее их колебания и ниже звук. Точно таким же образом колебания атома могут происходить только с частотами из вполне определенного набора, причем каждая мода соответствует определенной орбите в старой модели Бора-Брика Брадфорда. В обычной планетарной системе не существует запретов, которые заставляли бы планеты занимать только какие-то заданные орбиты.

Напротив, в атоме электроны-волны могут обращаться вокруг ядра только вполне определенным образом. Квантовая механика справедлива для любых форм материи и, следовательно, для самих фотонов, для ядер и их составных частей, протонов и нейтронов. Чем больше частица, тем менее заметны эффекты, связанные с соотношением неопределенности Гейзенберга. Структура ядер не оставляет никаких сомнений относительно квантовой природы их составных частей.

Замечания по поводу вероятностной интерпретации

Экспериментальные подтверждения справедливости квантовой механики столь убедительны, что должны были развеять всякое недоверие к ней. Но остаются сомнения в плане философском: хорошо известно, что Эйнштейн был против понимания существа теории на основе принципа неопределенности так же, как Шредингер и де Бройль, которые на первых порах вместе с Эйнштейном были творцами новой механики. Споры касались только истинного смысла теории, а вовсе не справедливости ее предсказаний или математического аппарата.

С точки зрения Эйнштейна, теория была несовершенной; но столь же несовершенной является и статистическая механика, поскольку она занимается только свойствами вещества, справедливыми в среднем, и не проследивает движение каждого отдельного атома; да и по существу статистическая механика дает такие предсказания относительно поведения вещества, которые в большинстве случаев могут быть получены с той же степенью достоверности на основе термодинамики без какого-либо упоминания о существовании атомов. В своей работе физики всегда имеют дело с несовершенными теориями, справедливыми только для ограниченного круга явлений, пока, как иногда бывает, они не открывают какие-то новые явления, вынуждающие их выходить из области справедливости этих теорий и строить новые.

Вне всяких сомнений, квантовая механика будет в конце концов превзойдена, и, возможно, окажется, что сомнения Эйнштейна были обоснованы. В настоящее же время, похоже, нет ни физиков, которые видели бы дальше собственного носа, ни конкретных предложений, как преодолеть рубежи квантовой механики, ни экспериментальных данных, указывающих на такую возможность.

4. В глубь атома

Согласно квантовой механике, нельзя одновременно определить с абсолютной точностью скорость и положение электрона, В действительности утверждение еще сильнее: согласно представлениям Гейзенберга, Бора и почти всех отцов-основателей современной теории, нельзя даже вообразить электрон, положение и скорость которого были бы определены с абсолютной точностью. Этот запрет распространяется на все элементарные частицы и на их объединения, включая атомы и молекулы. Почему же тогда мы не можем заметить этого запрета в случае движения бильярдного шара или автомобиля?

Сразу скажу, что эффект и здесь существует, но по ряду причин мы его не замечаем. Во-первых, любое измерение, выполненное с помощью инструментов, пусть даже самых совершенных, не может быть идеальным в том смысле, что положение и скорость не могут быть определены совсем без ошибки. Ошибки присущи физическим измерениям; можно стремиться к их уменьшению, но избавиться от них полностью невозможно. Во-вторых, неопределенность, предсказанная Гейзенбергом, уменьшается с увеличением массы рассматриваемого объекта, пока не становится совершенно незаметной в случае макроскопических тел.

Еще об атоме водорода

Атом водорода состоит из одного-единственного электрона, обращающегося по орбите вокруг одного протона. Электрон и протон имеют противоположные заряды, так что они притягиваются; вместе они нейтральны. Исключительная простота этой системы сделала возможным ее строгий математический анализ, вершиной которого явились модель Бора и уравнение Шредингера.

В этой теории электрон может вращаться вокруг ядра только по определенным заданным орбитам (т.е. находиться в определенных «состояниях», как говорят в квантовой механике). Обычно атомарный водород соответствует самой низкой из этих орбит, той, на которой электрон расположен ближе всего к протону и, следовательно, сильнее всего с ним связан.

Соотношение неопределенности запрещает электрону падать на протон и сливаться с ним. Если бы это все же произошло, то электрон попал бы в ограниченный объем пространства, в сто тысяч раз меньший занимаемого самим атомом; вследствие этого неопределенность в величине его скорости намного возросла бы, достигая таких больших значений, что электрон мог бы снова покинуть протон. Так что только очень большая сила притяжения может ограничить объем, занимаемый электроном. К рассмотрению электронных орбит можно подойти и с другой точки зрения, с волновой, уже упомянутой выше.

В атоме сила притяжения, создаваемая протоном, изгибает электронную волну; призма или любая преломляющая среда вызывают аналогичное искривление световых волн, которое имеет точно такую же математическую структуру; это и вдохновило Шредингера на создание своего знаменитого волнового уравнения. Протон ведет себя как симметричная сферическая линза с плотностью, непрерывно увеличивающейся к середине. В результате электронная волна вынуждена искривляться, обвиваясь вокруг протона и замыкаясь сама на себя. Волна оказывается запертой внутри атома («связанной») притяжением противоположных электрических зарядов. Это может происходить по-разному. Существуют и другие колебательные состояния (называемые «возбужденными»), в которых волна занимает большую область в пространстве. Поглощение кванта света или столкновение атома с другими частицами могут перевести электрон («возбудить атом») с одной орбиты на другую. Спустя долю секунды происходит обратный переход в состояние с более низкой энергией, причем освободившаяся энергия излучается в виде фотона с частотой, пропорциональной энергии и полностью определяемой структурой атома водорода.

Сложные атомы

Атом водорода (да и все другие атомы и ядра) испускают энергию вполне определенными «квантами», прежде чем вернуться в свое основное состояние. «Цвет» этих квантов является «автографом» атома и позволяет его опознать на расстоянии, даже если он находится где-то в самых отдаленных галактиках. В начале прошлого столетия позитивист Конт высказал мнение, что бессмысленно пытаться изучать природу звезд, так как человек не имеет никакой возможности достать кусок звезды и подвергнуть его химическому анализу, а всего несколько лет спустя Фраунгофер, изучая спектры, сумел с достоверностью установить присутствие обычных химических элементов в звездах, положив этим начало современной астрофизике.

При переходе к более сложным атомам мы обнаружим, что центральные ядра состоят из некоторого числа протонов и нейтронов, во многом похожих друг на друга. Протоны и нейтроны, имея почти одинаковую массу (~1840 электронных масс), в основном отличаются наличием заряда у протона и держатся вместе внутри ядра за счет сил очень большой величины, но короткодействующих. Вокруг ядра вращается столько связанных электрическими силами электронов, сколько протонов в ядре; и опять атом как целое нейтрален. Описать простыми выражениями многочисленные и сложные конфигурации атомов с двумя или более электронами невозможно.

Периодическая система Менделеева

Надо всегда иметь в виду, что электроны, имея одинаковый заряд, отталкиваются друг от друга; их движение мало напоминает движение планет, которые, можно сказать, величественно вращаются вокруг Солнца, не чувствуя или почти не чувствуя взаимного притяжения. По этой причине точный расчет более сложных атомных структур – дело совсем не простое, и до сих пор в решении этой задачи имеются непреодолимые трудности. Анализ становится еще сложнее, если рассматривать атомы на близких расстояниях друг от друга, когда становится возможным обмен электронами, что, в сущности, равносильно возникновению межатомных сил. В свою очередь эти силы ответственны за химические явления, поразительное разнообразие которых не нуждается в комментариях.

Несмотря на указанные осложнения, общая структура электронного облака в атоме довольно прозрачна, и из нее уже извлечена значительная информация. Невозможно прослушать курс химии и не услышать о периодической таблице элементов Менделеева. Менделеев составил список элементов по возрастающим атомным весам (на самом деле по массам ядер) и обратил внимание на строгие закономерности, которым элементы подчиняются, объединяясь в последовательности по схожим химическим свойствам. Незаполненные места в этих последовательностях соответствовали элементам, открытым или искусственно созданным (как, например, технеций) позднее. Наблюдения Менделеева в целом оказались исключительно ценными для дальнейших научных поисков и предсказаний.

Принцип запрета Паули

Выдающийся успех модели атома Бора состоял, в частности, в обеспечении солидного теоретического обоснования системы Менделеева. Для достижения этого, правда, понадобилось еще одно открытие, имевшее большое теоретическое значение. Изучая атомные спектры гелия (у которого два электрона), физик Вольфганг Паули обнаружил странный принцип запрета: электроны всячески избегали совместно занимать одну и ту же орбиту. Как оказалось, принцип Паули имеет всеобщее значение и справедлив для любых атомов и систем, содержащих электроны. Этот принцип приводит к тому, что электроны в своем коллективном движении вокруг ядра образуют развитую конфигурацию «скорлупок», или оболочек. Действительно, все электроны не могут одновременно занять самую низкую орбиту. Учитывая, однако, что орбиты одного размера могут быть по-разному наклонены и что на каждой орбите, имеющей свой строго определенный наклон, может находиться по одному электрону, мы приходим к тому, что на одинаковом расстоянии от ядра может находиться вполне определенное – небольшое – семейство электронов; одинаковые, но по-разному наклоненные орбиты и образуют общую для этого семейства электронную оболочку, или скорлупу.

Обычно атомы представляют в виде множества электронных орбит, образующих последовательность оболочек вокруг центрального ядра. Такой образ неточен по причинам, которых мы уже касались. Строго говоря, орбит вообще нет, существуют только волны, огибающие ядро. Для выяснения того, как себя ведет какая-нибудь волна, недостаточно знать, что электроны отталкиваются, нужно еще знать, где находятся другие волны. Тем не менее в первом приближении такое представление годится для создания зрительного образа.

Оболочечная структура и химические свойства

Электронная оболочка, заполненная всеми положенными ей электронами, оказывается очень стабильной и тесно связанной с ядром. В конечном счете она образует сферически-симметричный панцирь, защищающий ядро, и уменьшает его эффективный электрический заряд, окружая положительные протоны отрицательными электронами. Поэтому электроны внешних оболочек воспринимают остальную часть системы как ядро с меньшим зарядом и оказываются менее связанными; кроме того, существует сходство между конфигурацией этих электронов и той, которую они образовали бы вокруг ядра с меньшим эффективным зарядом; это сходство приводит к сходству химическому и лежит в основе теории Менделеева.

Химические свойства атома зависят почти исключительно от структуры и конфигурации самой внешней электронной оболочки. Эта оболочка может быть не целиком заполнена: полное число электронов в атоме задано (зарядом ядра), и его может не хватить для точного заполнения всех отведенных мест во всех электронных оболочках. А вот так называемые благородные газы, которые почти не участвуют в химических реакциях, состоят из атомов, все оболочки которых полностью заполнены. Итак, принцип Паули несет ответственность за стабильность вещества и за огромное разнообразие химических соединений; само наше существование связано с ним. Если бы вдруг он потерял силу, то атомы коллапсировали бы до конфигураций, чрезвычайно маленьких и химически инертных; вещество в знакомом нам виде перестало бы существовать. Принцип Паули имеет глубокие корни и основан на

изначальных и существеннейших свойствах геометрии нашего пространства. Придя из микрокосма, он тем не менее оказывает непосредственное влияние на стабильность звезд.

5. Ядерные силы

После изложения основ теории относительности, квантовой механики и атомной физики интереснее всего охарактеризовать в общих чертах имеющиеся данные о самой глубинной структуре материи, т.е. поговорить о физике атомных ядер и элементарных частиц. Прежде чем начинать рассказ о ядерных силах, уместно бегло напомнить этапы пути, приведшего к становлению квантовой механики.

Атомы

Разговор о частицах всегда начинается с атомов, представление о которых восходит к Демокриту, жившему примерно 400 лет до н.э. Демокрит считал, что атомы – это неделимые частицы материи, различающиеся только формой, величиной, положением и порядком, и что таких атомов есть четыре вида:

атомы земли, воды, воздуха и огня. Этот путаник Аристотель добавил к ним еще атомы эфира. Длительное время считалось, что атомы этих пяти видов представляют собой пять платоновских правильных многогранников (среди которых куб и октаэдр). Химия девятнадцатого столетия сумела объяснить огромное разнообразие химических соединений и конфигураций вещества, используя меньше сотни различных атомов, выстроенных в ряды в изумительной периодической системе Менделеева.

Если не подниматься выше нескольких тысяч градусов Цельсия и пренебречь явлениями, связанными с радиоактивностью, то атомы можно рассматривать, как шарики, лишенные внутренней структуры и способные вступать в связи друг с другом согласно сложным правилам игры химической валентности. Они воспринимаются при этом как элементарные объекты, невидимые и неизменные. Открытие электрона Томсоном в конце прошлого века и создание модели Бора-Резерфорда, напротив, показали, что атом имеет чрезвычайно сложную структуру и что исследование истинных составных частей вещества только начинается.

Работы Бора привели к рождению популярного образа атома, подобного планетарной системе, в которой электроны вращаются вокруг очень маленького и тяжелого ядра. Электроны заряжены отрицательно и притягиваются положительным зарядом ядра. От этого заряда зависит число электронов в атоме и, следовательно, его химические свойства. Аналогия с Солнечной системой, как уже говорилось, не лишена недостатков. В то время как все электроны строго одинаковы, Земля, например, значительно отличается от Марса или Юпитера. Орбиты планет лежат примерно в одной плоскости (эклиптике), а электронные орбиты наклонены по-разному и заполняют пространство вокруг ядра, образуя последовательность оболочек различной структуры. Тем не менее основное возражение против такого упрощенного представления атома состоит в другом.

Фотоны

В 1887 г. Герц обнаружил, что ультрафиолетовое излучение, падая на металлическую поверхность, может вызвать электрический ток (фотоэлектрический эффект). Падающее излучение поглощается, и его энергия идет на то, чтобы оторвать электрон от атома и освободить его. Проявления эффекта казались весьма странными. Электрону в атоме энергия излучения может быть передана только определенными порциями, пропорциональными частоте излучения. Энергия света оказывается распределенной по квантам, или «атомам» света, называемым фотонами. Фотон был открыт Эйнштейном, давшим правильное объяснение фотоэлектрического эффекта (Нобелевская премия была присуждена ему именно за это исследование, а не за теорию относительности).

Возврат к корпускулярной теории света имел серьезные последствия для всей остальной физики. Для наблюдения какого-нибудь объекта его необходимо осветить дождем из фотонов. Предельная точность, с какой можно определить положение объекта, равна длине волны фотона. Если бы наши глаза видели только сантиметровые радиоволны радара, то мы бы не воспринимали объекты размерами меньше одного сантиметра. Так что при желании увидеть одиночный электрон с помощью микроскопа нам пришлось бы использовать очень коротковолновое излучение, чтобы, например, установить положение электрона внутри атома.

Вероятностное описание

Но малая длина волны равносильна очень высокой частоте и, следовательно, соответствует очень энергичным (жестким) фотонам. Эти фотоны, сталкиваясь с электроном, передают ему энергию, меняя при этом его скорость непредсказуемым образом. Чем лучше известно положение электрона, тем хуже будет измерена его скорость. Большинство физиков (но не Эйнштейн) склонялось к интерпретации так

называемой Копенгагенской школы, согласно которой эти ограничения на измеримость положения электрона (да и любой другой частицы) внутренне присущи материи и не зависят от способа наблюдения. Из этого подхода и родилась квантовая механика, согласно которой неопределенность Гейзенберга, в сущности, выражает тот конструктивный принцип, который должен заменить строгий детерминизм Лапласа вероятностным подходом к движению материи.

Вероятностный подход не был принят теми, чьи работы привели с неизбежностью к его становлению, т.е. де Бройлем, Шредингером и самим Эйнштейном, который во время памятных дебатов с Нильсом Бором безуспешно пытался расправиться с таким подходом с помощью различных дьявольски изощренных контрпримеров. Следуя своей интуиции, мы представляем себе электрон как мельчайший снаряд, для которого можно в принципе определить последовательность положений в зависимости от времени (траекторию, или орбиту). Напротив, согласно доводам Копенгагенской школы, лучшим аналогом электрона служит волна, распространяющаяся по поверхности моря.

Ни в коем случае не следует всерьез говорить об орбите, или траектории, электрона; эти понятия приближенны и окажутся неадекватными, как только мы начнем изучать движение электрона детально. Электрон, как, впрочем, и все частицы, открытые впоследствии (включая фотон), в сущности, представляет собой волну, а атом можно сравнить с резонансной полостью, в которой находятся сложнейшие электронные волны.

Как уже говорилось, колебания в атоме происходят только в соответствии с набором вполне определенных электронных конфигураций, каждая из которых приближенно соответствует какой-нибудь одной из старых орбит планетарной системы (не всем орбитам соответствуют электронные конфигурации). Такое явление называется «квантованием»; нельзя переходить непрерывным образом с одной орбиты на другую, это можно делать только вполне определенными скачками.

Постигнув атом, физики обратили свое внимание на ядро.

Ядра и ядерные реакции

Резерфорд был первым, кто понял, что в естественном радиоактивном распаде элементов кроется ключ к пониманию строения атомного ядра, и начал в 1919 г. серию экспериментов, в которых впервые осуществил искусственные превращения ядер одних элементов в другие.

Невозможно в нескольких строчках рассказать об интенсивной работе, приведшей в 1932 г. к открытию нейтрона Чедвиком и, наконец, к удовлетворительному описанию атомного ядра. Существуют две элементарные частицы, протон и нейтрон, сила взаимодействия которых намного больше электрической, но которую можно почувствовать только на исключительно коротких расстояниях. Такие силы связывают вместе протоны и нейтроны (называемые нуклонами). Эти связанные состояния как раз и являются атомными ядрами. Масса электрона исчезающе мала по сравнению с массой нуклонов (примерно в 1840 раз меньше); нейтроны и протоны имеют приблизительно равные массы.

Водород состоит из одного-единственного электрона, вращающегося вокруг ядра из одного протона. А уран состоит из 92 электронов, вращающихся вокруг ядра из 92 протонов и 143 нейтронов. Протоны имеют положительный электрический заряд, а нейтроны нейтральны. Отрицательный заряд электронов компенсирует заряд протонов, поэтому атом как целое нейтрален.

В химических реакциях атомы обмениваются электронами. Ядра в этом не принимают участия, а вот в ядерные реакции они вовлекаются, и в этих реакциях освобождаются энергии в миллионы раз больше, чем в химических. Наиболее примечательная из таких реакций – это деление урана-235 (отметим, что $235 = 92 + 143$ – это полное число частиц, составляющих ядро). Все протоны имеют одинаковый заряд и отталкиваются друг от друга. По этой причине ядро, содержащее много протонов, может быть нестабильным и стремиться к распаду на два ядра поменьше, которые, следовательно, стабильны. В общем ядра, которые намного тяжелее урана-235, делятся с такой большой скоростью, что все нестабильны, а ядра легче урана-235 вовсе не делятся или делятся с трудом.

Деление

Чудесным образом оказалось, что ядро самого урана-235 не делится только тогда, когда его «не трогают». Если же с ним сталкивается медленный нейтрон, то тотчас происходит деление этого ядра на два больших осколка да еще два или три нейтрона. Поэтому если в кусок урана-235, состоящий из миллиардов миллиардов атомов, попадет первичный нейтрон, который вызовет деление ядра урана и появление других нейтронов, то в свою очередь эти новые нейтроны тоже вызовут реакции деления и рождение дополнительных нейтронов. Каждое деление происходит за очень короткое время (меньше одной миллионной секунды). Таким образом, теоретически должно было бы произойти деление всех атомов урана и рождение огромного количества нейтронов. Каждое деление освобождает большое количество энергии:

тысячная часть всей массы превращается в энергию согласно формуле $E = mc^2$, так что при делении 1 кг урана высвободилось бы энергии около 25 млн. кВтч.

Если бы действительно за короткое время произошло деление всех ядер, то мы имели бы взрыв атомной бомбы. В реакторе же дела идут иначе. Прежде всего природный уран представляет собой смесь, содержащую преимущественно уран-238, который не делится, и меньше 1% урана-235. Вот почему большинство нейтронов в конце концов поглощается неделящимися ядрами, и цепная реакция не возникает, если для этого не приняты специальные меры: урановые стержни в реакторе окружают так называемым замедлителем (обычной или, лучше, «тяжелой» водой, графитом или бериллием) для замедления вылетающих нейтронов, чтобы они с большей эффективностью вызывали деление. При таком устройстве реактор управляем; если начинается его перегрев, то в него вставляются стержни из материала (например, кадмия), сильно поглощающего нейтроны, что приводит к прекращению реакции.

Мезоны Юкавы

Но вернемся к ядерным силам. Используя представления только о нуклонах, электронах и фотонах, можно (в принципе) дать органичное описание всех химических свойств вещества и начать изучение ядер в правильном направлении. Теория поля, являющаяся, без преувеличения, одной из самых трудных научных дисциплин и краеугольным камнем современной физики, объясняет электрические силы, сводя их к обмену фотонами между заряженными частицами, т.е. не существует действия на расстоянии (которое, кстати, противоречило бы теории относительности), а электрические силы передаются квантами света, играющими роль клея для электрических зарядов.

С помощью дерзкой аналогии японец Юкава постулировал существование тогда еще не найденных частиц, π -мезонов, или пионов, которые должны были «склеивать» нуклоны, играя роль ядерных сил. В послевоенное время пионы, наконец, были обнаружены и детально изучены на ускорителях нового поколения. Существуют пионы положительные, нейтральные и отрицательные, они образуют семейство (триплет) частиц, которые, если не считать заряда, почти тождественны; это семейство добавляется к семейству нуклонов (дублету), имеющему похожие свойства. Успех, пришедший с открытием пионов, побудил физиков заняться постройкой все более мощных ускорителей. Вначале они просто раздвигали мешавшие стены старых зданий, а потом дошли до проектирования таких ускорителей, как комплекс ЛЭП в ЦЕРНе, имеющий в окружности 30 км. За развитием ускорителей последовали открытия новых частиц; теперь уже вновь обнаруженная частица ни у кого не вызовет удивления, если, конечно, не будет наделена какими-то особо привлекательными свойствами.

Частицы и античастицы

Почти все эти частицы чрезвычайно нестабильны, за исключением, например, электрона, протона и фотона. Некоторые частицы распадаются за времена, очень большие по сравнению с атомными; так, время жизни свободного нейтрона больше четверти часа. Что же мы узнали, изучая эти частицы? Кроме всего прочего, была подтверждена теория Дирака, согласно которой всякая частица имеет свою античастицу с совпадающими и одновременно «противоположными» свойствами. Так, антипротон имеет массу и характеристики движения такие же, как у протона, но противоположный заряд. Антиэлектрон (называемый позитроном) положителен и вместе с антипротоном может образовать атом антиводорода. Наконец, фотон сам является своей античастицей, так же как и нейтральный пион. Можно вообразить целые галактики, состоящие из антивещества. Отличить их от нормальных галактик можно было бы, выполнив очень тонкие наблюдения, находящиеся пока за пределами экспериментальных возможностей наших астрофизиков. Развита на основе представления о существовании позитрона квантовая электродинамика с исключительной точностью объясняет множество эффектов, имеющих важное философское значение и обнаруженных при излучении света атомами.

6. Элементарные частицы

Рассмотрим теперь более подробно основные свойства так называемых «элементарных» частиц. Изучение этих свойств представляет, кроме всего, и заметный методический интерес, поскольку приводит к обсуждению самого процесса исследования исходных составляющих вещества.

Семейства частиц

Сколько элементарных частиц обнаружено до сих пор? Если судить по толщине кратких справочников, где описаны их свойства и которые имеют хождение среди физиков, то несколько сотен. Многие из этих частиц собраны в семейства, похожие на семейства нуклонов или пионов. Эти семейства играют роль, сравнимую с ролью периодической системы Менделеева, столь полезной в химии. Но именно

такое сходство и наталкивает на мысль, что мы занимаемся классификацией объектов, похожих на атомы, а вовсе не элементарных. Так или иначе, но уже снова начались поиски действительно элементарных составляющих вещества. К 1963 г. выяснилось, что частицы следует объединять в более обширные семейства. Так, например, нуклоны вместе с Λ -частицей и с частицами $\tilde{\Sigma}^0$ и $\tilde{\Xi}^0$ должны были образовать сверхсемейство из восьми членов (октет); таким же образом пионы вошли в другой октет и т.д.

Древнегреческие философы приписывали атомам исключительно правильные и симметричные формы. Хотя реальные атомы весьма далеки от этого, мысль о том, что в физике понятие симметрии должно играть важную роль, осталась. Классификация частиц по семействам как раз и отражает существование какой-то симметрии в природе; рассмотрим ее.

SU-3-симметрия

Гейзенберг считал протон и нейтрон двумя состояниями одной и той же частицы – нуклона. Нуклон может перемещаться в пространстве, вращаться вокруг собственной оси, подобно волчку («спин»), а также принимать два различных образа – быть либо нейтроном, либо протоном. Подобные рассуждения применимы и к трем пионам. Согласно такой точке зрения, переход между протоном и нейтроном происходит в другом, особом, пространстве, для построения которого необходимо ввести дополнительную степень свободы и не ньютоновские измерения.

Прерывистый характер таких переходов обусловлен принципами квантовой механики и тесно связан с идеей квантования орбит, о которой мы уже говорили. Новое пространство, в котором перемещаются нуклоны и пионы, кроме того, что в нем возникают другие семейства частиц, примечательно еще и высокой степенью симметрии (самую простую аналогию мы получим, вообразив круг или сферу). Из этой симметрии следует прежде всего, что частицы, входящие в одно семейство, имеют почти одинаковые свойства, если не считать электрического заряда. Наличие сверх семейств (как говорят физики, мультиплетов SU-3) означает, что у частиц имеются дополнительные степени свободы, или возможности изменения состояния. Существует математическое понятие группы, на котором мы не будем здесь останавливаться. С помощью этого понятия и производится систематизация всех возможных и воображаемых симметрий. Теория групп вошла в теоретическую физику еще в 30-е годы, и ее триумфальное шествие продолжается по сей день. На ее основе можно предсказать детали строения и внутренние иерархии всех семейств группы SU-3; в действительности эти предсказания можно распространить на любую симметрию, включая те, которые еще предстоит открыть.

Кварки

Так было предсказано существование сверхсемейств, состоящих из десяти членов; в одном из них сначала отсутствовал десятый член - частица Ω -, впоследствии открытая на ускорителях. Что еще более удивительно, теория предсказала существование семейства всего из трех частиц, ни одна из которых не была еще обнаружена в природе. Эти гипотетические частицы окрестили «кварками» (слово заимствовано из романа Джойса «Поминки по Финнегану»; «кварк» по-немецки означает также «творог»). Если кварки существуют, то они должны иметь еще не встречавшийся ни у одной частицы дробный электрический заряд, кратный одной трети заряда электрона. По этой причине и из-за их упорного нежелания показаться на ускорителях многие физики ставили под сомнение само их существование. С другой стороны, оказывается очень удобным считать нуклоны, пионы и почти все известные частицы состоящими из кварков. Нуклон, например, состоял бы тогда из трех кварков, а пион – из кварка и антикварка.

Совсем недавно были открыты частицы, для объяснения существования которых требуется введение четвертого и даже пятого кварка. Каждый кварк обладает набором свойств, который получил название «аромат» (flavour по-английски).

Первая пара кварков, объясняющая строение нуклонов и пионов, известна как *u*- и *d*-кварки (*up* – «вверх» и *down* – «вниз»). Очарованный и странный (от англ. charm и strangeness) кварки дают начало другим частицам; наконец *b* – (от слов bottom – «дно» или beauty – «красота») и *t* (от top – «вершина» или truth – «истина») кварки должны объяснять или предсказывать новые семейства частиц. Кварк *t* еще не обнаружен, но существует мнение, что он будет открыт в недалеком будущем. Как мы видим, кварки объединены в пары (поколения).

Семейства 1963 г. образованы кварками *u*, *d* и *s*; открытие кварков *b* и *t* привело к появлению сложных классификационных схем, которые могли бы составить конкуренцию структурным формулам органической химии. По причинам, на которых у нас нет возможности останавливаться, каждый кварк существует в трех состояниях (каждому из которых присвоили свой «цвет»: желтый, красный, синий – как цвета испанского флага). Итак, должно быть восемнадцать кварков, отмеченных «цветом» и «ароматом». Некоторые физики считают это число слишком большим и хотели бы разложить кварки на более простые или элементарные составные части.

Глюоны

Что же связывает кварки друг с другом? Для этой цели были придуманы глюоны (glue по-английски означает клей) и создана теория, похожая на квантовую электродинамику и названная квантовой хромодинамикой. Эта теория рассматривает сложный пространственно-временной пинг-понг, отражающий передачу посредством глюонов огромных сил, связывающих отдельные кварки. Такие теории пока еще очень далеки от строгих выводов, подобных тем, какие дает квантовая электродинамика, и, хотя они объясняют качественно многие результаты сами являются объектом горячих споров.

Один из наиболее заметных успехов теории связан с экспериментами на ускорителе «ПЕТРА» (PETRA) в Гамбурге. Согласно выводам квантовой хромодинамики, мы не видим свободных кварков, потому что силы взаимодействия между ними, передаваемые глюонами, не убывают с увеличением расстояния. По сути, кварки всегда связаны атомной «пружиной», которая удерживает их с силой в несколько тонн. В Гамбурге наблюдали столкновения электронов и позитронов очень высоких энергий. Их общая энергия в таком столкновении может материализоваться (согласно формуле $E = mc^2$), превращаясь в пары частиц кварк-антикварк, которые резко расходятся, растягивая «атомную пружину». В конечном итоге множество возникающих при этом частиц разлетается в виде двух струй, ориентированных вдоль «пружины». Временами рождается глюон, который дает начало третьей струе.

Еще одно важное подтверждение существования кварков основано на наблюдаемом распределении заряда внутри нуклонов, которые, судя по всему, состоят из «кусков» с электрическими зарядами, равными дробному заряду – заряду кварка.

Критика понятия элементарности

Полностью ли мы уверены в этих результатах? Попытки во что бы то ни стало найти элементарное всегда сводились к сменявшимся успехам и разочарованиям, которые наслаивались друг на друга, как серия китайских резных шаров. От атомов мы перешли к ядрам, от ядер к нуклонам, от них к кваркам; уже есть предложения заняться поисками «ришонов» («ришон» на языке идиш означает «первый»), т.е. первичных составляющих вещества. Такие занятия Гейзенберг подверг критике, подхваченной затем Фейнманом. Когда электрон присоединяется к протону, освобождается энергия, соответствующая превращению некоторой массы согласно формуле $E = mc^2$. Этой массы должно не хватать в атоме, который будет «весить» немного меньше, чем его составные части. Пропадает, конечно, ничтожная масса, меньше миллиардной части полной. А вот при образовании ядра уже исчезает одна тысячная часть массы; в случае ядер в отличие от фанерных самолетов вычитается масса клея. В некоторых моделях Ферми пион представлялся как связанное состояние протона и антипротона, каждый из которых имеет массу, в пять раз большую, чем пион; следовательно, «клей» уносит в этом случае 90% всей массы.

Итак, составные части оказываются заметно больше целого. Нельзя и дальше судить о степени элементарности какого-либо объекта на основании его величины; так, масса кварков может оказаться намного больше массы пионов. Это означает также, что процесс дальнейшего проникновения в глубь элементарных частиц может оказаться бесконечным, и, удивляясь, мы будем открывать новые, все более тяжелые, но вовсе не более простые объекты с «клеем» чрезвычайно большой массы.

Квантовая механика усугубляет эти трудности любопытным образом. Соединяясь друг с другом, две частицы вынужденно оказываются в квантованных состояниях; при этом, как в атоме водорода, допустимы только определенные орбиты. Здесь применить критерий элементарности труднее: если бы мы наблюдали непрерывную последовательность орбит, постепенно исчезающих одна внутри другой, то могли бы утверждать, что имеем дело с объектом сложным, но такая возможность закрыта наличием квантов. По этой причине получила распространение идея, согласно которой все частицы состоят друг из друга, и ни одна из них не является элементарной. Другие теории представляют частицы в виде колебательных состояний какого-то сверх поля, являющегося единственной реальностью. Согласно этим теориям, сами понятия элементарности и составного состояния неадекватны и несовершенны. Среди не доведенных до конца попыток создания такой теории следует отметить теорию Гейзенберга, не лишенную в высшей степени оригинальных идей.

Слабые взаимодействия

Мир построен не только из кварков. Это с очевидностью следует из того факта, что электрон и его нейтральный товарищ нейтрино (частица, которую очень трудно обнаружить) не состоят из кварков.

Эти частицы входят в семейство «лептонов», состоящее из трех поколений, как кварки, но лишенных цвета. Кроме поколения электрон – нейтрино, еще обнаружены поколения мюон – нейтрино и τ -мезон – τ -нейтрино. Существуют так называемые слабые взаимодействия, связывающие пары поколений как кварков, так и лептонов. Мы напомним здесь о взаимодействии, ответственном за β -распад ядер, в котором нейтрон превращается в протон, электрон и нейтрино. Согласно теории Салама и Вайнберга-Глэшоу при

сверхвысоких энергиях слабые взаимодействия не являются более таковыми и должны объединиться с электромагнитными силами; рождающаяся при этом симметрия обладает ослепительной красотой.

Нарушение симметрий

Итак, природа скрывает часть своего великолепия и заставляет нас строить мощные ускорители, чтобы увидеть лишь эфемерную искорку. Но, как говорил Эйнштейн, «Бог остроумен, но не зол». Эйнштейн был прав: без явного нарушения симметрии, наблюдаемого при низких энергиях, мы не существовали бы, и вещество не принимало бы знакомые нам формы.

Как же на практике получается, что симметрия Вселенной скрыта от нас? Вообразим обыкновенный круглый таз, в котором находится бильярдный шар. Шар, помещенный в середине таза и предоставленный самому себе, скорее всего, скатится к стенке таза, туда, где дно ниже всего. Так что хоть сам таз обладает идеальной цилиндрической симметрией, но в целом общая конфигурация с шаром вне середины вовсе не симметрична. Мы привели пример в библейском стиле, где под тазом нужно понимать природу вообще: даже если она подчиняется в высшей степени симметричным законам, это вовсе не значит, что она должна обязательно оказаться в симметричной конфигурации. Однако если шар толкнуть как следует, то он начнет двигаться по всему тазу и почувствует его цилиндрическую форму. Такой толчок напоминает резкие столкновения, испытываемые частицами на наших ускорителях; на очень короткий промежуток времени вещество вновь обретает свою симметрию, и узнать об этом можно, выполняя серию очень тонких экспериментов.

Значение сил разных типов

Какое значение для человека имеют упомянутые взаимодействия? Как ни странно, все они важны, и это проявляется вполне определенным образом. Гравитационные силы соединяют звезды и планеты; без этих сил вещество в космосе приняло бы неопределенную форму аморфной пыли, линейной структуры, а в звездах не начались бы термоядерные реакции, в которых происходил синтез углерода, необходимого для нашего существования. Электромагнитные силы, как уже было сказано, связывают атомы и делают возможными химические реакции. Сильные взаимодействия обеспечивают связь ядер и вообще ответственны за современное устройство мира элементарных частиц. И слабые силы имеют свое предназначение: в термоядерных реакциях, протекающих в недрах Солнца, происходит непрерывное превращение протонов в нейтроны посредством обратного β -распада, о котором мы уже говорили. Изменение, пусть даже самое незначительное, скорости протекания этой реакции оказало бы серьезное воздействие на светимость Солнца, а значит, и на климат на Земле.

Нарушение симметрии относительно инверсии времени

Наконец, в некоторых процессах, судя по всему, наблюдаются взаимодействия, проявляющиеся при так называемом нарушении CP-симметрии (от английских слов charge – заряд и parity – четность). В теории поля существует фундаментальный принцип, известный как «CPT-теорема», согласно которому каждому возможному процессу в природе соответствует другой, где частицы наделены зарядами и координатами противоположного знака, а ход времени изменен на обратный. Нарушение симметрии относительно операции зарядового сопряжения и инверсии пространственных координат означает, следовательно, нарушение симметрии относительно обращения хода времени. Если бы мы прокрутили фильм о Солнечной системе в обратном направлении, то увидели бы планеты, движущиеся по несуществующим, хотя и вполне возможным орбитам: законы Ньютона остаются неизменными при обращении хода времени. Еще недавно физикам казалось, что симметрия относительно обращения времени должна сохраняться также и в микрокосме элементарных частиц.

Процессы, в которых нарушается CP-симметрия, разрушили такие представления. Речь идет об эффектах чрезвычайно тонких, наблюдение которых представляет серьезные трудности. Обнаружение таких эффектов в другой галактике в принципе позволило бы выяснить, состоит она из вещества или антивещества. В этих процессах отличие вещества от антивещества связано с направлением хода времени.

Обращение времени в космологии

В последние годы выяснилось, что роль указанных процессов в космологии очень велика. В момент большого взрыва время, если можно так выразиться, бежало только вперед, расширение Вселенной приводило к сильной асимметрии между прошлым и будущим. Мы имеем в виду время, когда Вселенная была заполнена очень горячей смесью равных частей вещества и антивещества. Асимметрия в поведении стрелки времени благоприятствовала тогда разрушению антивещества (пусть даже в малой степени) и оставила избыток протонов. Ядра атомов всего существующего в настоящее время вещества во Вселенной

образовались из этого незначительного избытка протонов. Таким образом, само наше существование обязано деятельности сверх слабых взаимодействий в считанные доли секунды после большого взрыва. Если такое представление получит подтверждение, то это означает, что через невообразимо длительный промежуток времени (в годах цифра состоит из единицы, за которой следует 30 нулей) все оставшиеся протоны распадутся и Вселенная окажется заполненной только излучением. Что ж, подождем и посмотрим, успеет ли она, как утверждают некоторые физики, сначала замкнуться сама на себя, повторив большой взрыв в обратном направлении.

7. На пути к единой теории?

Чтобы как-то закончить описание общей картины, до сих пор рисовавшейся как действия различных сил в природе, имеет смысл упомянуть о настойчивых попытках ученых построить единую (объединенную) теорию всех взаимодействий.

Что подразумевается под единой теорией? Точного и формального определения для нее не существует. Как правило, «единой» считается теория, заменившая и объединившая предшествовавшие ей отдельные теории и позволяющая предсказывать не только явления, предсказуемые прежними теориями, но еще и новые. Кроме того, в возникновении новой теории должна быть необходимость: старые теории подобны деталям, подогнанным друг к другу в оправе новой, каждая деталь нуждается в остальных, и ее собственное существование отдельно от других оказывается неоправданным.

Такая необходимость не всегда очевидна, и ее трудно оценить; иногда она сводится к необходимости эстетической, приводя к простоте, которая впоследствии оказывается мнимой. Для обозначения естественности какой-нибудь гипотезы Эйнштейн применял немецкое слово *vernünftig* (разумный).

Первым, кто пытался создавать единую теорию, был вовсе не Эйнштейн. В некотором смысле вся история физики – это история подобных попыток. Эйнштейн, можно сказать, был первым физиком, подошедшим столь близко к синтезу этой теории, и первым, кто сознавал, насколько важна деятельность такого рода.

Вклад Эйнштейна

Сегодня мало кто из физиков считает оправданными усилия, предпринятые Эйнштейном на пути к полному объединению теорий, даже если многие признают, что в его последних работах имеется много интересных идей, которыми для различных построений впоследствии воспользовались другие, вдохновляемые примером прославленного мастера. Ни одна из этих теорий не достигала конечной цели. Причин этого много.

Сначала Эйнштейн думал объединить гравитацию и электромагнетизм, он считал, что все явления иной природы окажутся следствиями законов новой единой теории. Он не представлял, насколько расширится круг так называемых «элементарных» частиц и насколько усложнятся их внутренняя структура и поразительные свойства симметрии. Все это было открыто благодаря технической революции в экспериментальной физике уже после его смерти. Более того, Эйнштейн, как известно, так и не принял квантовую механику, хотя, открыв кванты света (фотоны), он стал одним из ее создателей.

Невозможно разобраться в запутанной структуре субатомного мира, не пользуясь квантовой механикой, без нее нельзя понять законы симметрии; планы экспериментов составляются на языке квантов. Поэтому не Эйнштейну, а другим, работавшим в другом направлении, удалось достичь определенных успехов в частичном объединении теорий. Среди таких объединенных теорий, созданных в последнее время, особенно важной стала теория Салама и Вайнберга (с участием Глэшоу; свой вклад в развитие этой теории внесли также Хоофт, Хиггс и другие), в которой объединяются слабые взаимодействия и электромагнитное поле, а гравитация остается в стороне. В самом ближайшем будущем, несомненно, появятся новые объединенные теории.

В каком смысле развитие физики можно назвать процессом объединения? Типичный пример нам дал Максвелл, объединивший оптику и теорию электромагнитного поля, показав при этом, что свет – это колебания электромагнитного поля. Тот же Максвелл заложил основы для объединения термодинамики и аналитической механики, создав кинетическую теорию газов. Согласно этой теории, тепло представляет собой не особую форму энергии, а всего лишь механическую энергию, беспорядочно распределенную между миллиардами миллиардов частиц, составляющих газ.

Схема Эйнштейна, пожалуй, лучше очерчена и более точна. Эйнштейн был убежден (справедливо, как нам кажется) в том, что описание природы должно быть основано на понятии волны. Хорошо известным примером этого служит как раз электромагнитное поле. Само его название указывает, что это поле состоит из двух составляющих, из полей электрического и магнитного. Вполне законно рассматривать эти два поля как независимые величины, но сам Максвелл интуитивно чувствовал, что они каким-то таинственным образом связаны.

Теперь вспомним специальную теорию относительности и будем рассматривать разных наблюдателей, движущихся равномерно друг относительно друга. Эйнштейн сразу почувствовал исключительную важность того, что один наблюдатель может увидеть смесь электрического и магнитного полей, в то время как другой будет считать это же поле только электрическим, и наоборот. Отсюда и возникает та необходимость объединения, о которой мы говорили раньше. Так что релятивистский вариант теории Максвелла оказался объединенным в упомянутом нами смысле. В этом же смысле можно утверждать, что общая теория относительности объединила силы, казавшиеся несвязанными, например, гравитацию и инерцию, силы тяготения и центробежные.

Кроме самого Эйнштейна попытки создать единую теорию были предприняты еще в 1919 г. математиком Вейлем. Чтобы дать об этом некоторое представление (пусть даже неполное), я расскажу о понятии кривизны в общей теории относительности.

Гауссова кривизна

Применительно к линии на плоскости смысл понятия кривизны очевиден. Так, прямая линия не имеет кривизны, в то время как кривизна окружности постоянна. В общем случае кривизна линии меняется от точки к точке.

Физиков, однако, интересуют не только простые геометрические фигуры. Так, большой интерес вызывает рассмотренный Гауссом случай поверхности в трехмерном пространстве. Почему? Как известно, кривую линию на плоскости всегда можно выпрямить, не растягивая и не укорачивая ее. Если же взять сферическую поверхность, то какой бы маленький кусок ее мы ни пытались уложить на плоскость, нам все равно пришлось бы его вытянуть, сломать или еще как-то деформировать. Таким образом, сфере присуще особое внутреннее свойство, отличающее ее от плоскости, а именно кривизна, выражающая само геометрическое существо и не зависящая от способа построения сферы в трехмерном пространстве.

Нарисовав треугольник на поверхности Земли, мы обнаружим заметное отличие его свойств от свойств треугольника на плоскости: сумма углов последнего в точности равна 180° (π радиан). Если же начертить треугольник с вершинами на Северном полюсе, в городах Кито (Экватор) и Либревиль (Габон), то получится треугольник с тремя прямыми углами, сумма которых будет равна 270° !

Такое расхождение не позволяет печатать достоверных земных атласов на плоских листах. Кстати, согласно известной теореме сферической геометрии, сумма внутренних углов треугольника α , β , γ , уменьшенная на 180° , пропорциональна площади треугольника:

$$\alpha + \beta + \gamma - \pi = \text{Площадь} / (\text{Радиус сферы})^2 = A / R^2$$

В этой формуле все углы берутся в радианах. В случае рассмотренного земного треугольника мы, кстати, имеем

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ = \pi/2$$

оттуда

$$A = R^2 (3\pi/2 - \pi) = \pi R^2/2 = 4\pi R^2/8$$

Площадь, как мы видим, становится равной одной восьмой всей сферической поверхности. Действительно, треугольник с тремя прямыми углами занимает один октант сферы. Приведенную формулу можно представить в следующем виде:

$$1 / R^2 = (\alpha + \beta + \gamma - \pi) / \text{Площадь}$$

по этой формуле можно вычислить $1/R^2$, т.е. «гауссову кривизну», зная площадь треугольника и его углы, т.е. величины, которые можно измерить, просто гуляя по Земле, не привлекая никаких сведений о внешнем пространстве.

Все эти представления были обобщены Риманом на случай пространств любой размерности; тогда место величины $1/R^2$ занимает знаменитый тензор Римана, учитывающий изменение кривизны по всем направлениям.

Кривизна и материя

Выдающаяся идея Эйнштейна состояла в том, чтобы связать эту кривизну с распределением вещества в пространстве. Согласно Эйнштейну, пространство обладает кривизной, а мы до сих пор ее не замечали, потому что она мала и проявляется только через гравитационные эффекты.

Особенно наглядной является картина пространства, предложенная Эддингтоном. Он сравнивал пространство с хорошо натянутым эластичным полотнищем, которое в нормальном состоянии лежит целиком в плоскости. Если положить на полотнище тяжелые шары (символизирующие небесные тела), то оно искривится, изменив при этом свою геометрию. Каждый из двух находящихся рядом шаров стремится

скатиться в яму, образованную соседом. Так, через посредство полотнища между шарами появляется сила взаимодействия, аналогичная силе тяготения. Действительно, в общей теории относительности силы тяготения возникают за счет искривления окружающего пространства. Между кривизной пространства и распределением вещества существует соотношение вида $1/R^2 = (G/c^2) \cdot \rho$.

В этой формуле G представляет универсальную гравитационную постоянную, c – скорость света (около 300000 км/с), и G/c^2 приблизительно равно 10...27 см/г. Плотность ρ измеряется в граммах на кубический сантиметр, так что правая часть соотношения измеряется в см⁻², как и кривизна. Приведенная формула, по существу, представляет собой основной результат, полученный из уравнений поля Эйнштейна (если не считать длинного ряда тензорных индексов, от перечисления которых мы избавим читателя). Плотность воды соответствует кривизне R , равной примерно 100 млн. км. Таков радиус сферы, которую должна заполнить вода (если бы она была несжимаема), чтобы стать гравитационно-нестабильной и коллапсировать в черную дыру.

Параллельный перенос Леви-Чивита

Итальянскому математику Леви-Чивита пришла в голову гениальная идея, как объяснить и описать кривизну. Эта идея оказалась источником разнообразных обобщений и была использована выдающимся французским математиком Картаном.

Проведем мысленный эксперимент: поместим пушку на Северный полюс и направим ее ствол в сторону г. Кито (Эквадор). Затем перевезем пушку по поверхности Земли в Кито, а из Кито в Либревиль (Габон) (оба города находятся на экваторе), сохраняя во время путешествия ствол пушки параллельным его первоначальному направлению. По прибытии в Либревиль ствол пушки будет направлен вдоль меридиана, т.е. на Юг. Если же мы сразу перевезли бы пушку в Либревиль, то он по прибытии был бы направлен вдоль экватора (в сторону Кито). Итак, результат зависит от конкретного пути, и в нашем случае (речь идет о результате точном и общем) угол между двумя этими направлениями и равен тем 90°, которые добавились к сумме внутренних углов треугольника.

Все это означает, что если пространство обладает кривизной, то вообще нельзя говорить о параллельности двух направлений, не исходящих из одной точки. В нашем пространстве этот эффект настолько мал, что заметить его в эксперименте типа эксперимента Леви-Чивита практически невозможно; тем не менее эффект существует и имеет большое философское значение. Нельзя в принципе делать какие-либо утверждения относительно взаимной ориентации двух удаленных друг от друга объектов; кривизна пространства вносит свои коррективы.

Теория Вейля

Идея Вейля заключалась в том, чтобы рассматривать кривизну нового типа, которая не только поворачивала бы ствол пушки непредсказуемым образом, но и меняла бы его длину. В пространствах Вейля не только невозможно точно узнать, в одну ли сторону направлены стволы двух далеких друг от друга пушек (математики их называют векторами), но и нельзя выяснить, одинаковой ли они длины.

Оговоримся сразу: теория неприменима по причинам чисто физическим. Легко себе представить пушку, все характеристики которой, кроме ориентации в пространстве, сохраняются неизменными, но просто невозможно мановением волшебной палочки изменить масштаб. Было бы очень удобно менять по своему желанию средние расстояния между атомами, но они определяются химическими силами и изменить их, увы, не в наших силах. Нельзя вообразить воду, которая при нормальных условиях имела бы плотность, равную 2 г/см³. Все это привело к тому, что идея Вейля не была подхвачена, если не считать сложных и очень глубоких математических обобщений (среди которых теория Вайнберга и Салама), основанных на так называемых калибровочных (gauge) теориях, берущих начало от теории Вейля. Вейль считал, что кривизна нового типа связана непосредственно с электромагнитным полем; присутствие последнего должно вносить неконтролируемые, хотя и небольшие изменения масштабов, аналогичные изменениям в направлении, к которым приводит гравитация.

Предложено уже множество единых теорий. Эйнштейн выдвигал еще теории, основанные на представлении о несимметричном метрическом тензоре. В этих теориях угол между прямыми А и В не равнялся углу между прямыми В и А. Желаемого успеха эти теории не имели.

Другие объединенные теории были предложены Клейном и Калуцей. Эти авторы добавили к пространству-времени еще одно измерение, доведя их число до пяти. Они рассматривали электрический заряд как скорость в пятом измерении, в результате чего электромагнитное поле вдоль пятого измерения становилось похожим на гравитационное.

Эти попытки также не были лишены различных изъянов; они оказались недостаточно vernünftig (разумными), чтобы прижиться. Кстати, такие же замечания справедливы в отношении предложения

Вейля; обе теории намного ближе друг к другу, чем может показаться с первого взгляда; они входят как составные части в современные, более глубокие разработки.

Надо ли удивляться появлению этого или какого-либо иного пятого измерения, которые время от времени привлекаются для решения различных задач, связанных с классификацией частиц? Возможно, приверженцы «летающих тарелок», уже распознали в нем источник явлений, преподнесенных нам в фильме «Контакты третьего рода». Более того, иногда предлагается вводить не только одно дополнительное измерение, встречаются модели, в которых их целая дюжина. Все эти предложения, лишённые четкой теоретической основы, напоминают огромную связку ключей, в которой физик роется в тщетной надежде найти подходящий для открытия своего замка. Отметим, что «измерением» называется любая степень свободы движения частиц, которая с математической точки зрения аналогична, хотя и формально, привычному для нас понятию «размерности» (откуда и произошло это название).

Не существует, строго говоря, «средства передвижения», которое позволило бы нам совершить путешествие в этом дополнительном измерении. Для этого пришлось бы выполнять различные странные действия, как, например, замена протонов нейтронами; речь идет о действиях, еще имеющих смысл на микроскопическом уровне, когда в них вовлечено небольшое число частиц (например, в опытах на ускорителе), но они совершенно немыслимы в куске вещества макроскопических размеров.

Поэтому надо очень осторожно относиться к появляющимся иногда в средствах массовой информации сенсационным сообщениям, не прошедшим строгой проверки. Трактовка таких сомнительных сведений может привести к ошибочным выводам. Впрочем, хотя призыв к осторожности, конечно, уместен, тем не менее надо отметить, что в настоящее время наблюдается интересный процесс обновления научных исследований и бурление всевозможных оригинальных идей в области объединения теорий. После смерти Эйнштейна многочисленные неудачи, преувеличенный академизм некоторых научных публикаций определенного сорта привели к падению интереса и доверия к усилиям, предпринимающимся на полном приключений пути к объединению. События последних двадцати пяти лет вдохнули новую жизнь в этот процесс. Нужно упомянуть среди них техническую революцию, позволившую осуществить ранее немыслимые способы проверки теории относительности.

Многообещающе в этом смысле результаты, достигнутые в исследовании элементарных частиц. Весьма вероятно, что в течение последующих пяти или десяти лет мы окажемся свидетелями выдающихся успехов: частичное объединение теорий слабых и электромагнитных взаимодействий, осуществленное Саламом и Вайнбергом, указывает, что какое-то движение происходит, и происходит оно в правильном направлении.

8. Сверхтекучесть

Газ гелий

Впервые газ гелий был обнаружен на Солнце с помощью спектроскопии, и его название происходит от греческого слова *helios* (Солнце). На Земле гелий добывается из некоторых месторождений метана и используется в основном для наполнения дирижаблей, поскольку он, как и водород, легче воздуха и в отличие от него не горит. Будь это единственным отличительным свойством гелия, он мог бы всего лишь возбудить любопытство, не заслужив особого интереса. Однако с точки зрения физиков гелий обладает свойствами исключительными и важными.

Любой газ при охлаждении сначала превращается в жидкость, затем при дальнейшем охлаждении затвердевает. Гелий же в твердое состояние не переходит; жидким он становится при температуре, равной примерно четырем градусам выше абсолютного нуля (-269°C), т.е. при четырех градусах Кельвина (4 К), и дальше, сколько его ни охлаждать, он остается жидкостью. Почему же гелий так себя ведет?

Атомы газа можно сравнить с множеством шариков, испытывающих слабое взаимное притяжение, пока расстояния между ними больше определенной минимальной величины; при приближении друг к другу на это минимальное расстояние атомы начинают себя вести, как жесткие шары, и дальнейшее их взаимное сближение становится невозможным. Если бы атомы могли свободно следовать силам взаимного притяжения, то расстояния между ними сокращались до некоторого минимального значения, при котором атомы, объединившись, образовали компактную структуру (твердый кристалл), в котором они были бы расположены вдоль упорядоченных линий. Это происходит при охлаждении жидкости, когда атомы лишаются своей энергии и движение их замедляется.

Атомы гелия подобны атомам других так называемых благородных газов (неон, аргон, криптон, ксенон), которые имеют абсолютно сферическую форму, испытывают слабое притяжение и практически не способны образовать химические связи. Кроме того, атомы гелия в пять раз легче атомов неона, остальные благородные газы еще тяжелее неона. Ядро гелия состоит всего из двух нейтронов и двух протонов, в то время как ядра атомов неона состоят из двадцати нейтронов и протонов.

Роль соотношения неопределенности

Поле силы, создаваемое атомом, можно сравнить со рвом, окружающим его, а сам атом – с тонкой, чрезвычайно высокой скалой, возвышающейся в центре. В этой аналогии потенциальная энергия в какой-то точке – это просто ее высота над окружающей равниной. Следовательно, ров соответствует отрицательной энергии (притяжение), в то время как скала соответствует энергии положительной (отталкивание). Другой, соседний, атом похож на шарик, который может катиться вниз по подножию скалы, пока не остановится в самой низкой точке (минимальная энергия). Каждый атом «перекачивается» в поле других, пока не остановится в точке, соответствующей наименьшей энергии. Но действительно ли останавливается атом? Если бы мы говорили о макроскопических шариках, сомнений не было бы: потеряв свою энергию, шарик остановится.

Атомы гелия, однако, имеют очень небольшую массу m , из-за чего вступает в силу соотношение неопределенности Гейзенберга.

Это соотношение ограничивает точность, с которой можно измерить положение или скорость частицы. Оно утверждает, что:

$$(\text{Ошибка в скорости}) \times (\text{Ошибка в положении}) \geq h / m$$

(h представляет собой универсальную постоянную Планка, появляющуюся в квантовой теории: $h = 6,626 \cdot 10^{-27}$ эрг·с; как уже было сказано, она выражает, например, пропорциональность между энергией фотона E и его частотой ν : $E = h\nu$).

Следовательно, если мы говорим, что атом остановился на дне рва, да еще точно задаем его положение, то тем самым констатируем неопределенность его скорости. При большой величине m еще можно обойти возникшую трудность, отказавшись от точного задания положения атома и уменьшив таким образом его скорость. Если же, однако, масса мала, как в случае атома гелия, то попытки ограничить его местонахождение областью притяжения в конце концов придадут атому достаточную скорость и, следовательно, энергию, чтобы из этой самой зоны выйти.

Сверхтекучесть

По этой причине решетка атомов гелия не образуется, и он не затвердевает, если только не заставить атомы проделать это насильно, сжав гелий до давления 25 атм. и более. При охлаждении гелий превращается в жидкость, а при дальнейшем понижении температуры наблюдается поразительное явление – переход к сверхтекучему состоянию, не имеющему аналогов ни в одной другой системе, за исключением, быть может, ядерной жидкости в нейтронных звездах да еще сверхпроводников. Переход от нормального состояния к состоянию «сверхжидкости» представляет собой исключительное зрелище.

Нормально жидкий гелий непрерывно поглощает тепло от стенок сосуда, в котором находится; при этом он бурно кипит, как вода в кастрюле. При достижении так называемой λ -точки, т.е. 2,17 градусов Кельвина, гелий вдруг перестает кипеть, хотя и продолжает интенсивно испаряться. Дальше такая жидкость может течь без видимых следов вязкости (отсюда и название – сверхтекучесть), проходя беспрепятственно через очень маленькие отверстия и капилляры. Что же происходит в λ -точке? Мы попытаемся дать доступный ответ на этот вопрос.

Статистика Бозе-Эйнштейна

Вспомним, что элементарные частицы делятся на две большие категории, на фермионы и бозоны. Электрон и нуклоны относятся к первым, а фотон и пионы – ко вторым. Соединяя вместе два фермиона, мы получим бозон, один бозон и один фермион дадут фермион, и, наконец, объединив два бозона, мы получим бозон. Другими словами, если считать фермионы «нечетными», а бозоны «четными» и рассматривать объединенные частицы, как сумму фермионов и бозонов, то мы как раз получим описанные правила, из которых, кстати, следует, что атом гелия представляет собой бозон. Действительно, он содержит два электрона, два протона и два нейтрона. Говорят также, что бозоны подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна, а фермионы – статистике Ферми-Дирака; в основе этих утверждений лежит следующий эмпирический факт.

Мы знаем, что все частицы определенного сорта (например, электроны) абсолютно неразличимы; поменяв два электрона местами, мы получим физическое состояние, которое не только практически не отличается от начального, но даже считается совпадающим с ним. Это утверждение справедливо как для бозонов, так и для фермионов. Фермионы еще подчиняются принципу исключения Паули, запрещающему двум одинаковым фермионам находиться в одном и том же состоянии.

Возвращаясь к бозонам, мы видим, что правила статистики (например, то, что состояния, отличающиеся обменом двух или более одинаковых бозонов, считаются одинаковыми) приводят к любопытным последствиям. Представим, что мы имеем два бозона А и В, и рассмотрим два разных

состояния, обозначенные скобками. Мы можем помещать свои бозоны в то или иное состояние (скобки). Итак, запись (A) (B) указывает, что в первом состоянии находится бозон A, а во втором – B. Можно составить следующие четыре разные комбинации: (AB) (), (A) (B), (B) (A), () (AB). Если, однако, частицы A и B одинаковы, то две средние комбинации неразличимы, и мы получим всего три возможных состояния. Мы видим, что доля случаев, когда одинаковые частицы находятся вместе, увеличилась с одной второй до двух третей. Это, кажется, мало, но при переходе к очень большому количеству частиц выигрыш увеличивается и благоприятствует собиранию одинаковых бозонов в одном состоянии, что в некотором смысле противоположно принципу исключения Паули.

Следовательно, если в каком-либо состоянии имеется бозон, то вероятность найти в этом же состоянии еще бозоны заранее возрастает.

Далее, все атомы гелия представляют собой одинаковые бозоны, следовательно, они стремятся оказаться в одном и том же состоянии. Если бы отсутствовали силы взаимодействия между атомами и атомы были совершенно прозрачны друг для друга, то наблюдалась бы так называемая конденсация Бозе-Эйнштейна: при абсолютном нуле все атомы обрели бы минимальную скорость, допустимую соотношением неопределенности Гейзенберга. Поскольку местонахождение атома ограничено только тем, что он находится внутри сосуда с жидкостью, то неопределенность в его положении может достигать размеров этого сосуда, в то время как неопределенность в скорости при этом окажется очень небольшой. Следовательно, все атомы попали бы в одно и то же состояние абсолютного покоя, их положение в сосуде стало бы совершенно неопределенно, атомы с равной вероятностью могли бы находиться в любом месте.

Взаимодействие между атомами гелия

Однако если мы снова введем взаимодействие между атомами, то они уже не смогут неопределенно долго перемещаться в сосуде, не наталкиваясь на своем пути на другие атомы. В жидком гелии атом может беспрепятственно проходить только микроскопические расстояния порядка нескольких ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$). Вокруг любого атома все остальные создают заслон, похожий на клетку, из которой он выйти не может. Все же мы здесь имеем дело не просто с обычными шариками, но с бозонами. Приблизившись к стенке клетки, атом может поменяться местами с одним из окружающих атомов, который займет место внутри клетки. Атом может таким образом выйти за пределы клетки и, повторяя этот процесс, передвигаться по всему объему сосуда, хоть и не с такой легкостью, как прежде. Легкость, с которой происходит такое передвижение атомов, и отражает степень конденсации Бозе-Эйнштейна.

Другими словами, из-за взаимодействия между атомами вероятность оказаться им всем вместе в покое в самом нижнем состоянии исчезает, хотя и не совсем. Оставшаяся вероятность как раз и объясняет явление сверхтекучести; при абсолютном нуле состояние системы сравнимо с состоянием жидкости, в которой атомы могут свободно перемещаться в сосуде, но передвигаются еле-еле, только меняясь местами с соседними атомами. Известно, что при таких условиях среднее расстояние между атомами равно трем ангстремам, и все конфигурации, соответствующие таким усредненным условиям, равновероятны.

Волны и фононы

Сообщая системе энергию, мы возбуждаем в жидкости колебания в виде звуковых волн. Как в случае обычного звука в воздухе, в жидкости наблюдаются циклы чередующихся областей сжатия и разрежения. Согласно де Бройлю, понятия волны и частицы представляют дуальные, или дополнительные по отношению друг к другу, способы описания одного и того же явления. Частица с импульсом p имеет длину волны $\lambda = h / p$, и, наоборот, волне с длиной λ мы приписываем свойства частицы с импульсом $p = h/\lambda$. Итак, звуковая волна соответствует частице (или, лучше, «квазичастице»), называемой «фононом» и движущейся в жидкости как раз со скоростью звука и импульсом $p = h/\lambda$. Такое движение можно сравнить с движением фотона света.

Возбуждая колебания в полости, наполненной жидким гелием, мы тем самым создаем фононы, которые сгущаются все больше и больше; при этом температура гелия увеличивается до тех пор, пока фононы не образуют особый газ, сосуществующий с возбужденной жидкостью или, если угодно, «являющийся» самой этой жидкостью. Здесь важно, что такой фононный газ ведет себя как газ (или жидкость), состоящий из частиц. В частности, в нем наблюдаются «звуковые» волны второго поколения, называемые «вторым звуком» и предсказанные Ландау. Как обычный звук представляет собой волны сжатия и разрежения атомов газа или жидкости, так второй звук – это волны сгущения и разрежения фононов. Сгущение же фононов приводит к увеличению температуры, из-за чего второй звук в действительности отвечает чередующимся волнам тепла и холода, и для того чтобы его почувствовать, необходим термометр!

По определению фононы переносят энергию со скоростью звука (примерно 240 м/с в жидком гелии), т.е. практически мгновенно. Следовательно, сверхтекучий гелий является идеальным проводником тепла, и

его температура уменьшается или увеличивается строго равномерно по всему объему. Здесь не образуются области, в которых локальный перегрев приводит к появлению пузырьков, наполненных паром, что необходимо для того, чтобы началось кипение. По этой причине при температуре ниже λ -точки кипение гелия вдруг прекращается.

Шарик, движущийся в такой жидкости, может терять энергию, только возбуждая фононы (так по крайней мере считал вначале Ландау, не зная еще о существовании вихрей). Испускание фононов подобно появлению звукового удара при движении реактивных самолетов; он появляется, только если объект (будь то самолет или шарик) преодолеет звуковой барьер и его скорость превысит скорость звука. Итак, медленный шарик не может терять энергию и замедляться дальше; вот почему в жидком гелии отсутствует вязкость и наблюдается сверхтекучее поведение. Аналогичное рассуждение справедливо и для движения по исключительно тонким капиллярам.

Вихри и вязкость

В сверхтекучем гелии, однако, критерий Ландау нарушается; как только жидкость начинает двигаться со скоростью, равной не метрам, а всего лишь нескольким сантиметрам в секунду, снова начинают происходить диссипативные процессы, вовлекающие в игру вязкость. Эти процессы обязаны своим появлением новому типу возбуждения, вихрям, которые могут перемещаться с низкими скоростями и которые отрываются от движущихся шариков гораздо раньше, чем те испустят фононы. В сверхтекучей жидкости вихри очень тонкие (шириной 1 \AA) и практически невидимы; избавиться от них чрезвычайно трудно. Если заставить вращаться ведро, наполненное сверхтекучей жидкостью, то от его стенки немедленно отделится множество вихрей, направленных вдоль оси вращения и вместе напоминающих макро вихрь в обычной жидкости.

Если бы вихри не появлялись, то было бы невозможно заставить крутиться сверхтекучую жидкость вместе с сосудом; при вращении сосуда жидкость скользила бы без трения, отказываясь следовать за стенками сосуда. Таким образом, появление вихрей приводит к тому, что поведение сверхтекучей жидкости становится похожим на поведение нормальной. При дальнейшем нагревании сверхтекучей жидкости центры возбуждения в конце концов заполняют весь сосуд и жидкость перестает быть сверхтекучей; это происходит как раз в λ -точке. Если пропустить сверхтекучую жидкость через трубку, наполненную очень тонким спрессованным порошком, то, поскольку через такой фильтр вихри и фононы не пройдут, просочившаяся жидкость окажется более холодной, чем оставшаяся. Нагревая жидкость в какой-нибудь точке, мы вызовем появление фононов.

Эффект фонтанирования

При описании всех упомянутых явлений рассматривают жидкий гелий как смесь двух жидкостей: сверхтекучей, проходящей через тонкие отверстия, и нормальной, которая через такие отверстия пройти не может. Под нормальной жидкостью понимается та часть, в которой встречаются фононы и прочие возбуждения. Говорят, что при нагревании сверхтекучая жидкость переходит в жидкость нормальную и что этот процесс завершается в λ -точке.

Такой подход приводит к любопытным объяснениям различных странных эффектов, проявляющихся в жидком гелии, например фонтанировании. Погрузим вертикально в жидкость трубку, закрытую снизу упоминавшимся уже фильтром из тонкого спрессованного порошка и открытую сверху. Гелий частично войдет в трубку. Будем медленно нагревать внутренность трубки. При этом сверхтекучая жидкость превращается в нормальную, давление которой соответственно повышается. Однако, поскольку нормальная, вязкая, жидкость выйти через фильтр не может, она поднимет общий уровень жидкости в трубке, и тогда, согласно закону сообщающихся сосудов, в трубку через пробку снова потечет сверхтекучая жидкость. Таким образом, наблюдается непрерывный приток жидкости в трубку, и в конце концов она выбрасывается вверх в виде фонтана, отчего и произошло само название эффекта.

До сих пор мы считали, что имеем дело с гелием, состоящим из бозонов, т.е. с He^4 . Существует, однако, изотоп гелия, He^3 , ядро которого содержит только один нейтрон и поэтому является фермионом. Следовательно, и атом He^3 тоже представляет собой фермион, что вносит глубокие изменения в свойства жидкости при низкой температуре. Жидкий He^3 не затвердевает по той же причине, что и He^4 . При температурах в тысячные доли градуса Кельвина два атома He^3 объединяются, образуя так называемую «пару Купера», которая в некотором смысле играет ту же роль, что и атом He^4 ; действительно, мы снова имеем бозон, и снова наблюдаются сложные явления сверхтекучести, на которых мы не можем более задерживаться. Физики считают, что в ядерном веществе нуклоны аналогичным образом собираются в куперовские пары, что также приводит к явлениям сверхтекучести.

9. Сверхпроводимость

Открытие сверхпроводимости

В начале века «столицей холода» был Лейден, приятный голландский городок, имеющий давнюю традицию научных исследований.

В криогенной лаборатории Лейдена, ставшей впоследствии знаменитой, пионер техники охлаждения Камерлинг-Оннес сумел в 1908 г. впервые получить жидкий гелий. В последующие годы он же продолжал исследовать влияние глубокого холода на различные материалы.

При очень низких температурах принято отсчитывать градусы Цельсия от абсолютного нуля ($-273,15^{\circ}\text{C}$). Напомним, что при абсолютном нуле (наименьшая из возможных температур) вещество имеет минимальную энергию и тепловое движение прекращается.

Охлаждение медной проволоки приводит к уменьшению ее сопротивления, следовательно, медь, как, впрочем, и любой другой металл, может быть использована в качестве термометра, если известно, как именно меняется ее сопротивление с температурой.

В 1911 г. Камерлинг-Оннес как раз делал попытку использовать для таких целей проволоку из свинца, когда очередное охлаждение привело к полному исчезновению ее электрического сопротивления. Так была открыта сверхпроводимость, которая наблюдается во многих металлах и сплавах (но, как это ни парадоксально, не в меди и серебре, являющимися наилучшими проводниками при обычных температурах). Однако только в 1957 г. Бардин, Купер и Шриффер сумели дать удовлетворительное объяснение явлению сверхпроводимости, построив теорию, носящую их имя (теория БКШ).

Механизм проводимости

Прежде чем углубляться в теорию БКШ, следует разобраться в механизме обычной проводимости. Вспомним, что вещество состоит из атомов, содержащих тяжелое положительно заряженное центральное ядро, притягивающее отрицательно заряженные электроны.

Связанные ядро и электроны образуют единое нейтральное целое. Те электроны, которые последними пристраиваются к ядру, находят его в большой степени нейтрализованным теми, что прибыли раньше. Следовательно, внешние электроны слабее связаны с ядром, и поэтому два атома, оказавшись поблизости друг от друга, могут с легкостью обменяться ими; так возникают межатомные силы и химические валентности.

Межатомные силы в металле заставляют атомы выстраиваться в упорядоченные и компактные ряды, формируя решетку (называемую кристаллической). Такие решетки часто обладают поразительной симметрией.

В металле периферические электроны легко мигрируют от одного атома к другому. Эти электроны на самом деле не принадлежат больше определенному атому и образуют море отрицательных зарядов, способных свободно передвигаться через металл. Атомы образуют положительный фон, обеспечивающий нейтральность металла как целого.

Если приложить разность потенциалов к свинцовой проволоке, например присоединив ее к батарейке, то электроны (отрицательные) начнут двигаться в сторону положительного конца, к которому они будут притягиваться. Батарейка будет гнать их от отрицательного конца цепи к положительному, пока не истощится. В этом случае говорят, что батарейка создает ток в цепи. Таким образом, батарейка представляет собой «насос», качающий электроны вдоль проволоки – «трубы».

Почему же действие батарейки не приводит к непрерывному ускорению движения электронов? В действительности атомы в кристаллической решетке металла выстроены не идеально, и в металле имеются многочисленные дефекты, при соударениях с которыми электроны теряют свою энергию, передавая ее кристаллической решетке.

Колебания решетки проявляются в виде тепла; это как раз то тепло, которое создается электрическим током, заставляющим светиться нити лампочек, и используемое во множестве технических приложений. В отличие от проводника электроны в изоляторе крепко связаны с атомами и не могут свободно перемещаться и переносить электричество.

Механизм сверхпроводимости

Что же происходит в сверхпроводнике? Полный ответ на этот вопрос длинен и сложен. Обычно два электрона в пустоте отталкиваются, но в металле положительные заряды ядер экранируют отрицательные заряды электронов, и отталкивание может почти полностью исчезнуть. Во многих случаях экранировка оказывается неполной, и тогда сверхпроводимость не наблюдается.

В некоторых случаях решетка сжимается вокруг электрона, создавая таким образом облако положительных зарядов, обволакивающее этот электрон и притягивающее другие электроны. Результатом

является возникновение незначительного притяжения между электронами. Поскольку это притяжение слабое, оно приводит всего лишь к тому, что электроны передвигаются парами («куперовские пары», упомянутые выше); таким образом, возникает связь, подобная химической, но в тысячи раз слабее. Следовательно, куперовская пара подобна молекуле «двухэлектрона», а переход в состояние сверхпроводимости можно считать превращением электронного газа в газ, состоящий из таких «молекул». Аналогичное явление встречается в химии: так, если нагреть двухатомный кислород, он распадается на одиночные атомы, способные вновь объединиться при охлаждении.

Электронный газ, движущийся в металле, конденсируется в жидкость из куперовских пар, которую мы и будем называть «конденсатом». Радиус такой пары равен примерно 300 \AA (1000 \AA (ангстрем) = $1/100000$ мм), что намного больше расстояния между соседними атомами (несколько ангстрем). В море, состоящем из куперовских пар, трудно представить себе рябь или волны, длина которых была бы меньше самих пар. Поэтому неоднородности решетки с размерами не больше десятка ангстрем не представляют собой препятствия для течения конденсата, и потери энергии не происходит. Такова основная причина возникновения сверхпроводимости.

Конденсация БКШ, однако, не исключает полностью взаимодействия между парами электронов и кристаллической решеткой; такое взаимодействие, естественно, требует выплаты «энергетического штрафа». Действительно, при сообщении электронной паре энергии, достаточной, чтобы ее разбить, электроны могут воспользоваться присутствием решетки и передать ей тепло. Такой эффект наблюдается при температурах выше температуры сверхпроводящего перехода (несколько градусов Кельвина), а подогреть проволоку можно, например увеличивая силу тока в ней. Конденсат обычно движется без столкновений, но при увеличении скорости его движения наступает момент, когда пара может всю свою энергию использовать, чтобы разорвать связь, и тут же почувствует, что существуют препятствия. Тогда сверхпроводимость исчезает.

По этой причине практическая польза сверхпроводимости всегда ограничивалась умеренной величиной максимального допустимого тока; только недавно были открыты сплавы на основе ниобия, проводящие очень высокие токи и позволяющие, следовательно, получить чрезвычайно высокие магнитные поля.

Эффекты Мейснера-Оксенфельда

Исключительная подвижность зарядов в сверхпроводнике приводит к поразительным явлениям. Металл, естественно, экранирует любое электрическое поле, поскольку заряды в нем располагаются так, чтобы сохранить общую нейтральность вещества.

Большого внимания заслуживает эффект Мейснера-Оксенфельда. Если поместить сверхпроводник во внешнее магнитное поле, то оно немедленно вызовет появление постоянных токов на поверхности металла, препятствующих проникновению самого магнитного поля внутрь этого металла, т.е. сверхпроводник служит идеальной «диамагнитной» средой – он идеально экранирует магнитное поле. Экранирование эффективно только до критического значения магнитного поля; при дальнейшем увеличении поля токи, вызванные им, оказываются слишком большими, поле проникает в вещество, разваливает куперовские пары и разрушает сверхпроводимость.

Этот диамагнетизм вызывает любопытные эффекты; если бы мы надели на руку сверхпроводящую перчатку, то могли бы «почувствовать» и «схватить» силовые линии магнитного поля так же, как пучок спагетти. С «точки зрения сверхпроводника» магнит – это твердый предмет, из которого торчит огромный пучок упругих силовых линий. Если магнит поместить, например, в сверхпроводящую чашу, то он будет висеть в воздухе, поддерживаемый своим собственным магнитным полем.

В сверхпроводящем кольце ток может циркулировать бесконечно; эксперименты позволяют сделать вывод, что даже в течение ста тысяч лет неоднократные повторные измерения тока с помощью какого-либо из наиболее чувствительных способов не обнаружили бы никаких изменений тока. Здесь мы имеем, следовательно, нечто подобное вечному двигателю, благодаря которому заряд может вращаться по кругу без необходимости получать энергию от какой-нибудь батареи. Конечно, должно быть ясно, что извлечение энергии из такого кольца свело бы ток в нем к нулю.

Легко представить себе возможности применения сверхпроводников в технике, если бы мы могли изготавливать их из материалов, не требующих для перехода в сверхпроводящее состояние слишком низких температур. Тогда открылись бы необозримые горизонты для различных применений, начиная с передачи энергии на далекие расстояния без потерь и кончая созданием сверхмагнитов, практически не потребляющих электрической энергии, и проектированием сверхпроводящих рельсов, по которым поезд-магнит скользил бы совсем без трения. В связи с этим можно вспомнить сверхмагниты (сверхпроводящие магниты), используемые в современных ускорителях частиц.

Материал, пригодный для создания высокотемпературной сверхпроводимости (если бы он был найден) немедленно обрел бы огромное значение не только для промышленности; исследования в этом

направлении ведутся с использованием весьма внушительных средств, и результаты, возможно, не заставят себя долго ждать.

10. Энтропия

Энтропия играет фундаментальную роль для всей термодинамики и косвенно для всех ее практических применений (а их много), в которых происходят обмен теплом и преобразование его в энергию механическую или электрическую. Идеи, высказанные Ильей Пригожиным (бельгийский ученый, лауреат Нобелевской премии по химии) в книге «Великий союз» можно понять, только если предварительно постараться уяснить, что же такое энтропия.

Кроме того, занимаясь термодинамикой, мы сможем коснуться классической статистической механики, а о квантовой статистике мы уже получили некоторое представление при обсуждении сверхтекучести.

Начала термодинамики

Первое начало термодинамики утверждает, что теплота является формой энергии и что она должна учитываться как таковая в законе сохранения энергии. Когда включена электрическая печь, электрическая энергия источника питания превращается в теплоту. При ударе молота о наковальню механическая энергия движения молота превращается в теплоту. Наконец, при торможении автомобиля его энергия движения превращается в теплоту трения в тормозных колодках. Энергия ни при каких обстоятельствах не исчезает, она просто превращается в теплоту, чтобы затем рассеяться в окружающей среде. Энергия, естественно, и не возникает из ничего, вечное движение остается совершенно невозможным.

Но к этой теме мы вернемся в конце книги. Второе начало термодинамики накладывает дополнительные ограничения на взаимный обмен тепла и других форм энергии.

Каким же видом энергии является теплота? В прошлом веке бытовало мнение, что теплота— это жидкость, которая переливается из горячих тел в холодные. Правильное объяснение понятия теплоты было дано только на основе статистической механики. Материальное тело состоит из огромного количества атомов; газ можно представить как совокупность бесчисленных шариков, передвигающихся во все стороны и непрерывно сталкивающихся. Кусок кристалла горного хрусталя (кварца) кажется неподвижным и неизменным. Если бы мы могли заглянуть внутрь и увидеть там атомы, то обнаружили бы, что они расположены упорядоченно вдоль фигур, имеющих ту же симметрию, что кристалл, но они вовсе не неподвижны. Вся кристаллическая решетка непрерывно сотрясается от беспорядочных толчков атомов. Толчки усиливаются с увеличением температуры; при достижении некоторого предела они разрушают кристалл, и он распадается. Тепловая энергия представляет собой не что иное, как сумму энергий беспорядочного движения отдельных атомов; температура, в сущности, говорит нам о том, какая энергия в среднем приходится на один атом в среде.

Смысл энтропии

Примеры, которые мы только что привели, касались превращения энергии упорядоченного движения (электрических зарядов, кинетической энергии движения молота или автомобиля) в тепло, т.е. энергию беспорядочного движения частиц вещества. Во всех случаях мы имели дело с необратимыми процессами: никто еще не видел, чтобы электрическая печь начала вдруг передавать в электросеть свою энергию, охлаждаясь при этом; охлаждая тормоза автомобиля, мы не приведем его в движение и т.д. Все это подтверждает, что очень легко создать беспорядок и очень трудно (или, во всяком случае, требует определенных затрат) создать порядок.

Энтропия, по существу, представляет собой меру этого беспорядка, и, следовательно, при необратимых процессах она всегда растет. При перемешивании горячей воды и холодной ее температура усредняется. Вся энергия распределяется равномерно между молекулами воды. При этом энтропия увеличивается, и мы получаем энергию, более равномерно распределенную и в форме, менее удобной для использования. Из таких примеров мы должны извлечь полезный урок. Недостаточно иметь энергию, нужно, чтобы она была в форме, удобной для использования, и, следовательно, не «беспорядочная». Вода в море обладает огромными запасами энергии, которая однако, соответствует беспорядочному движению и которую поэтому нельзя использовать.

Локальное уменьшение энтропии

Существует способ обойти это непрерывное увеличение энтропии, и на нем основана почти вся наша современная техника. Второе начало термодинамики устанавливает общее возрастание энтропии, но вовсе не исключает ее уменьшения в ограниченной области при еще большем увеличении в другом месте. В

тепловой электростанции сжигается топливо и производится теплота, которая превращается затем в электрическую энергию, в высшей степени упорядоченную. На самом деле только третья или четвертая часть энергии горения превращается в электричество, в то время как остальная энергия по обыкновению идет на разогрев воды какой-нибудь реки. Итак, за возможность превращать тепло в электричество мы заплатили увеличением энтропии реки. Таким же образом в автомобильном двигателе внутреннего сгорания часть энергии бензина превращается в энергию движения, но гораздо больше ее рассеивается в окружающую среду через радиатор. Итак, общий беспорядок всегда усиливается.

Достаточно оглядеться, чтобы понять, насколько активно человек занимается увеличением энтропии. Почти вся наша деятельность приводит к превращению энергии в формы, все менее приспособленные для использования, и к распределению все более низкой температуры среди все возрастающего количества атомов. Как же мы выживаем в таких условиях?

Энергетическая проблема

Действительно, если вспомнить трудности с арабской нефтью, то возникают сомнения в нашей способности идти и дальше вперед. Человечество создавало развитую передовую технологию, широко и бесконтрольно используя ископаемое горючее и растрачивая при этом заложенную в нем химическую энергию. Эти ископаемые, так же как и ядерное горючее, будут исчерпаны, согласно самым благоприятным прогнозам, не позже чем через 200...300 лет.

Если мы окажемся достаточно везучими или способными, то до конца этого срока в наших лабораториях будет достигнут успех в использовании энергии термоядерного синтеза, при котором водород превращается в гелий. Такой успех позволил бы нам идти вперед практически бесконечно в сравнении с временем прошедшей эволюции человечества. При неудаче в осуществлении «управляемого синтеза» оставалось бы Солнце, в недрах которого широкомасштабный термоядерный синтез происходит естественным образом уже более 5 млрд. лет и, судя по всему, будет происходить еще столько же.

Итак, Солнце производит увеличение энтропии в гораздо более широких масштабах, чем человечество, несмотря на все несомненно успешные усилия, предпринимаемые человеком в деле разбазаривания средств. Так стоит ли нам впадать в уныние? Напротив, мы должны считать себя счастливыми. Ведь свет Солнца представляет собой относительно хорошо организованную форму энергии (она соответствует температуре, достигающей почти 6000°C), непрерывно падающей на Землю. Фотосинтез в растениях приводит к постоянному поглощению и накоплению этой энергии, которая затем частично излучается в пространство в виде инфракрасных лучей, имея гораздо большую энтропию, чем прежде. Таким способом земные организмы создают локальный порядок и продолжают процветать.

Гипотеза Пригожина

Согласно Пригожину, существование жизни на Земле является одним из многих примеров, когда наш враг энтропия может уменьшаться в ограниченной области ценой заметного ее увеличения в другом месте. В своей книге «Великий союз» Пригожин часто ссылается на пример нестабильности Бенара. Обычно, если слить вместе холодную и горячую воду, температура ее начнет выравниваться. Если же нагревать кастрюлю с водой, мы вызовем непрерывный подъем горячей жидкости, тогда как более тяжелая холодная вода будет опускаться вниз. Кроме того, однако, наблюдается выделенное движение конвекционных потоков, препятствующих встрече горячей воды с холодной. Таким образом, происходит разделение горячей и холодной воды и появление локальной упорядоченности. Это происходит за счет энергии газового пламени, которая рассеивается в окружающее пространство, проходя через кастрюлю и вызывая рост энтропии. Мы здесь снова наблюдаем увеличение локального порядка, связанное с увеличением беспорядка в других местах.

Заменив пламя Солнцем, а кастрюлю Землей с ее поразительной смесью химических соединений, мы получим фантастически организованные структуры, к которым как раз относятся живые существа. Согласно Пригожину, жизнь возникла не случайно, а является закономерным следствием, хотя и не единственно возможным, энтропического разбазаривания энергии Солнца или какой-нибудь другой звезды. Так ли это? Некоторые примеры, как, например, вышеприведенный пример с кастрюлей, поддаются строгому анализу. Другие связаны с некоторыми любопытными химическими реакциями Жаботинского. При общем желании понять причину создания столь сложных структур все остается пока на уровне захватывающих гипотез, еще не подвергавшихся сколько-нибудь серьезным проверкам. Поэтому такие гипотезы воспринимаются одобрительно людьми образованными, но не специалистами, в то время как физики относятся к ним с осторожностью.

Глава 4. К портретам ученых

1. Галилео Галилей

Итак, папа римский решил вновь открыть «дело» Галилея. Я предвижу волну полемических статей и экскурсов в историю. Исключениями из хора обычных политико-литературных стенаний должны стать выступления непосредственно заинтересованных кругов: физиков и представителей церкви.

Кем же был Галилей и какое значение должен иметь пересмотр его дела? За редкими исключениями, тщетными были бы поиски категорий людей, хуже физиков информированных в истории науки вообще и в истории Галилея в частности.

Такое положение в данном случае не должно нас удивлять. Мы говорим не о реальном человеке, а имеем дело с человеком-знаменем, с неким символом. Одни объявили Галилея героем движения против учения Аристотеля, знаменосцем науки в борьбе против темных сил религии, и в то же время другие пытались возвести его самого в ранг святого. Однако при ближайшем рассмотрении окажется, что Галилей был прежде всего гениальным человеком, величайшая заслуга которого состояла в открытии эры современной науки и преодолении старого, аристотелева, представления о Вселенной.

Хотя Галилей и стоял у истоков современной физики, он все же не был свободен от некоторых очень живучих предвзятых представлений. Так, он не придавал особого значения законам Кеплера и продолжал считать движение по окружности «совершенным», в чем следовал старым взглядам Аристотеля.

Галилей вовсе не был человеком непогрешимым и всегда корректным и во взаимоотношениях с другими учеными. Так, в своей полемике с иезуитами о происхождении комет он был совершенно не прав, когда с некоторым высокомерием настаивал на том, что речь идет всего лишь о процессах испарения, происходящих в верхних слоях атмосферы. Судя по всему, можно считать установленным, что за несколько месяцев до того, как Галилей официально объявил об обнаружении солнечных пятен, их наблюдал монах из Ингольштадта; поведение Галилея при этом только способствовало усилению ненависти к нему иезуитов.

Разумеется, черты характера Галилея ни в коей мере не оправдывают серьезной исторической ошибки, какой является процесс над ним; они могли лишь послужить поводом, побудившим нищих духом людей принять решения, оказавшие глубоко отрицательное влияние на все дальнейшее развитие культуры. Здесь мы сталкиваемся с другим аспектом процесса. Лично я не убежден в том, что суд над Галилеем нужно рассматривать только в рамках обычного противопоставления Веры Разуму, Прогресса Мракобесию и т.д.

Некоторые служители церкви тогда уже приняли систему Коперника и довольно непродвзято, хотя и с осторожностью относились к научным открытиям. В то же самое время эти люди сознавали, какую угрозу представляли новые идеи для господствовавшего порядка и мировоззрения, основанного на средневековой схоластике и канонизированном учении Аристотеля. Скорее всего, Галилей не сознавал революционное – причем не только и не столько с точки зрения культуры, сколько с точки зрения идеологии – значение своей научной деятельности. Но тот факт, что он решил опубликовать свои труды на общедоступном, понятном языке, а не на латыни, был воспринят церковью как провокационный жест, имевший целью распространение новой культуры в массах.

Таким образом, процесс над Галилеем представлял собой не только столкновение двух противоборствующих философий, но и акт мести. Вероятно, можно было бы избежать этого политического столкновения или смягчить его последствия, если бы Галилей поступал более осмотрительно. Во всяком случае я не вижу, как предложение церкви реабилитировать ученого может оказаться чем-нибудь иным, кроме как жестом чисто символическим.

Итак, какой же будет реакция ученых на пересмотр дела Галилея? Я не претендую на то, чтобы представлять своих коллег и высказываю только свое личное мнение. Откровенно говоря, мне кажется, что предложение пересмотреть дело явно запоздало. Если речь идет о попытке завоевать поддержку среди определенных кругов интеллигенции, то она обречена на провал и не устранил существующего недоверия к церкви. Во всяком случае, «антипроцесс» имеет четко выраженный политический оттенок, так же, как и сам процесс, на котором был осужден Галилей. Пересмотр дела Галилея мог бы еще иметь какой-то смысл не сейчас, а несколько десятилетий назад, в иной интеллектуальной и политической обстановке. Впрочем, может быть, лучше поздно, чем никогда.

2. Джеймс Кларк Максвелл

В 1879 г. скончался шотландец Дж.К. Максвелл, создатель электромагнитной теории света и один из основателей современной физики и техники. Физики считают Максвелла одним из «великих», самобытным мыслителем, внесшим фундаментальный вклад во все области физики.

Максвелл не пользовался особой известностью при жизни; его уравнения были написаны языком, непонятным для современников. В частности, Фарадей, будучи гением эксперимента, но несведущим в математике, никогда не придавал значения работам Максвелла. В чем же состоит вклад Максвелла в науку? В свое время Ньютон был убежден в том, что свет состоит из мельчайших частичек, скорость перемещения которых практически бесконечна. Его современник Гюйгенс, напротив, был сторонником волнового механизма распространения света, подобного процессу распространения звука в воздухе или в любой материальной среде. Непререкаемый авторитет Ньютона не допустил признания гипотезы Гюйгенса.

В 1700 г. Юнг, Френель и некоторые другие ученые приступили к исследованию оптических явлений, непонятных с точки зрения представлений Ньютона. Эти явления прямо указывали на волновую природу света. Как ни парадоксально, но среди этих явлений были и кольца Ньютона, хорошо известные фотографам и возникающие, когда диапозитив помещается между стеклянными пластинами. Яркая окраска некоторых насекомых также возникает в результате сложных процессов интерференции световых волн, происходящих в тонких слоях жидких кристаллов, расположенных на поверхности тела насекомых.

Можно сказать, что в 19 в. волновая природа света была окончательно установлена. Серия статей, опубликованных Максвеллом в середине столетия, ознаменовала собой начало большой и сложной работы по созданию математической теории электромагнитных явлений. По мнению Максвелла, должна была существовать бесконечно упругая и легкая среда, называемая эфиром, в которой свет распространяется подобно тому, как звук распространяется в воздухе. В своих заключительных расчетах Максвелл развил механистическую модель, согласно которой электрическое и магнитное поля представляют собой местное нарушение состояния эфира.

В настоящее время эфир уже вышел из моды (хотя и не совсем), и его слишком «материальный» образ практически забыт. Вместо него остались уравнения электромагнитного поля, объясняющие и предсказывающие поразительное множество разнообразных явлений, среди которых достойное место занимает распространение света, описываемое с удивительной точностью. Спустя несколько десятилетий после смерти Максвелла Герц экспериментально доказал существование радиоволн, отличающихся от света только длиной волны (длины световых волн меньше одной тысячной миллиметра, в то время как радиоволны имеют длины от одного миллиметра и выше). Наконец, Рентген открыл лучи, названные его именем и имеющие чрезвычайно малую длину волны, сравнимую с размерами атомов. Можно идти и дальше к еще меньшим длинам волн, вспомнить, например, о γ -лучах, испускаемых ядрами.

Если бы не было уравнений Максвелла, то теория относительности увидела бы свет значительно позже. Эйнштейн преклонялся перед Максвеллом и считал открытие электромагнитной природы света одним из наиболее выдающихся событий современной физики.

Однако не только теорией электромагнетизма интересовался Максвелл. В молодости ученый серьезно занимался небесной механикой; как мы уже говорили ранее, используя методы, которые вызывали восхищение Лапласа, Максвелл показал, что кольца Сатурна не могли быть ни твердыми, ни жидкими и что, скорее всего, они должны иметь структуру, подобную пене, состоящей из частичек, вращающихся вокруг планеты. (Этот вывод подтвердился во время недавнего визита космического зонда к Сатурну.)

Очерк Максвелла на эту тему был отмечен авторитетной премией Адамса.

Но это еще не все. Техника цветной фотографии и цветного телевидения основана на теории смешивания трех цветов, разработанной Максвеллом, и, хотя эта теория подвергалась неизбежным усовершенствованиям, она и сейчас служит основой различных технических приложений.

К приведенному списку следует добавить фундаментальный вклад Максвелла в кинетическую теорию газов. Окончательное доказательство существования атомов было приведено в знаменитой работе Эйнштейна, посвященной броуновскому движению и опубликованной в 1905 г. Но в середине 19 в., несмотря на успехи химии, весьма авторитетные физики (среди которых Мах, Оствальд и Кельвин) считали гипотезу атома феноменологической выдумкой, лишенной реальных основ. Такие возражения против атомов не мешали Максвеллу получить результаты на самом высоком уровне, которые открывали новые направления в физике. Согласно его модели, газ состоит из бесконечного числа движущихся атомов или молекул, которые непрерывно сталкиваются между собой. Если в какой-то момент времени мы могли бы измерить скорости атомов, то обнаружили, что они группируются вокруг некоторого среднего наиболее вероятного значения. Затем мы увидели бы, как атом, имеющий слишком большую скорость, при столкновениях с другими замедляется, подстраиваясь под общее движение, а неподвижный атом приводится в движение за счет непрерывных толчков. Состояние газа может быть охарактеризовано посредством этой средней скорости, а еще лучше с помощью средней кинетической энергии (энергии движения) атомов.

Максвелл был первым, кто понял, что эта средняя энергия может служить для строгого определения температуры газа, будучи пропорциональной ей. Чем сильнее нагревается газ, тем быстрее начинают двигаться его атомы. Теплота представляет собой неупорядоченное, хаотическое движение атомов; она не является свойством одного или нескольких атомов, и, чтобы говорить о теплоте, бессмысленно рассматривать отдельный горячий атом, а нужно иметь огромное множество атомов (в одном литре число

атомов выражается числом с 23 значащими цифрами). Непрерывно охлаждая газ, мы ограничиваем движение атомов, пока оно не прекращается совсем при абсолютном нуле температуры.

Кинетическая теория газов оказалась фундаментом, на котором была построена термодинамика; она также породила статистическую механику, в которую существенный вклад внесли Гиббс, Больцман и Эйнштейн.

В прошлом столетии Кельвин пользовался очень высоким авторитетом, сравнимым с авторитетом самого Ньютона, и, во всяком случае, он был гораздо более известен, чем Максвелл. Спустя сто лет они поменялись местами: физики редко ссылаются на Кельвина (разве только когда речь идет о температуре, отсчитываемой от абсолютного нуля и измеряемой в градусах Кельвина), в то время как исключительное положение Максвелла не вызывает сомнения.

3. Альберт Эйнштейн

Если для Ньютона 1666 г. был годом исключительным, то для Альберта Эйнштейна таким был 1905 г., когда неизвестный в то время служащий патентного бюро в Берне меньше чем за восемь недель опубликовал три фундаментальные работы, которые легли в основу современной физики.

Альберт Эйнштейн родился 14 марта 1879 г. в г. Ульме, земля Баден-Вюртенберг. Вскоре его родители переезжают в Мюнхен, земля Бавария, где Эйнштейн провел детство и посещал школу до четырнадцати лет. Когда Эйнштейну исполняется пятнадцать, он едет в Швейцарию, где в течение года посещает гимназию и заканчивает среднюю школу. В дальнейшем Эйнштейн продолжает учебу в Цюрихском политехникуме, где одним из его учителей был Минковский. В этот период он проводит несколько месяцев в Милане, куда его привез отец, неудачливый предприниматель. Наконец, с 1902 г. Эйнштейн живет в Берне и работает экспертом патентного бюро. Здесь он одновременно с работой готовился к защите диссертации, состоявшейся в 1905 г.

Этот год оказался переломным для Эйнштейна и современной физики; в течение короткого промежутка времени он опубликовал свои фундаментальные работы по молекулярной физике (о броуновском движении), по теории относительности и о фотоэлектрическом эффекте. Став уже известным, Эйнштейн получает в 1909 г. предложение (и принимает его) занять кафедру в Цюрихском университете; в 1911 г. он переезжает в Прагу, а в 1912 г. снова возвращается в Цюрихский политехникум. В 1914 г. Эйнштейн приглашен в Берлин в качестве преемника Ван'т Хоффа в Прусской Академии наук, а также в качестве директора Института физики. В 1916 г., наконец, сформулирована общая теория относительности; эта исключительно оригинальная теория получила блестящее подтверждение во время полного затмения Солнца в 1919 г., когда было обнаружено отклонение световых лучей, идущих от звезд, под действием гравитационного поля Солнца, причем именно такое отклонение, какое предсказал Эйнштейн. Приход Гитлера к власти в Германии вынудил Эйнштейна переехать в Принстон, США. В 1955 г., находясь в зените славы, Эйнштейн скончался, не закончив работу над одним из последних вариантов теории, которая должна была объединить электромагнитные и гравитационные явления.

Для правильной оценки деятельности Эйнштейна, разумеется, нельзя ограничиваться простым перечислением дат из жизни и академических титулов ученого, так же как нельзя опираться на огромное количество устных рассказов и анекдотов об Эйнштейне. Поэтому мы остановимся, пусть даже поверхностно, на основных этапах той части его деятельности, которая имеет отношение к развитию современной физики.

Первая работа Эйнштейна, которую мы неоднократно упоминали, посвящена фотоэлектрическому эффекту. Чтобы понять всю ее важность, следует вернуться на несколько сотен лет в прошлое. В 18 в. широкое распространение имела теория, поддерживаемая авторитетом Ньютона. Согласно этой теории, свет состоял из мельчайших частиц (корпускул), испускаемых светящимися объектами. Волновая теория, предложенная Гюйгенсом в 1690 г., имела очень мало приверженцев, среди которых был математик Эйлер. В начале 19 в. Юнг, а впоследствии и Френель обнаружили, что два световых луча могут при определенных условиях складываться и взаимно уничтожаться, причем эти эффекты чередуются. Такое явление совершенно непонятно с точки зрения корпускулярной теории Ньютона, но вполне естественно, если свет имеет волновую природу. Что свет представляет собой явление электромагнитное, было показано в работах Максвелла (1864 г.). Однако, хотя уравнения Максвелла превосходно описывают всевозможные варианты распространения световых волн, они совершенно не способны, как ни странно, объяснить явления излучения и поглощения света.

Особенно таинственным казался во времена Эйнштейна так называемый фотоэлектрический эффект, открытый Герцем в 1887 г. Ультрафиолетовое излучение, падающее на металлическую поверхность в пустоте, может поглощаться атомами металла; излучение, передавая энергию электронам, выбивает их из металла. Свет представляет собой быстро колеблющиеся электрические и магнитные поля, как раз и вызывающие выход электронов из металла. Казалось бы, увеличение интенсивности света должно привести

к увеличению средней энергии электронов. Однако, как ни странно, вылетающие электроны все имеют одинаковую энергию, хотя их число увеличивается.

Для объяснения этого явления Эйнштейн выдвинул гипотезу квантов света (названных впоследствии фотонами), согласно которой световое излучение существует в виде квантов, энергия которых принимает дискретные значения $h\nu$, где h – постоянная Планка, а ν – частота света.

Если атом поглощает фотон, то энергия последнего идет на преодоление некоторого заданного энергетического барьера (энергии связи), чтобы оторвать электрон от атома, и на сообщение ему энергии для вылета из металла. Следовательно, энергия вылетевшего электрона зависит только от частоты падающего излучения.

Согласиться с существованием фотона означало возвратиться к дискредитированной корпускулярной теории Ньютона, и поэтому работа Эйнштейна была воспринята крайне сдержанно. Миликен впоследствии вспоминал, что он «в 1915 г. был вынужден полностью признать (на основе эксперимента) справедливость вывода Эйнштейна, несмотря на кажущуюся его неразумность, связанную с тем, что он, казалось бы, опровергал все, что мы знали о волновой природе света». Почти восемнадцать лет, несмотря на свой успех, Эйнштейн был единственным, кто действительно считал гипотезу фотона справедливой; полемика на эту тему наконец прекратилась, когда в 1923 г. был открыт эффект Комптона, состоящий в том, что фотон сталкивается с электроном и сообщает ему энергию отдачи (точно так же, как при столкновении бильярдных шаров). Гипотеза квантов света оказалась решающей для построения квантовой механики, и, хотя Эйнштейн не был одним из ее непосредственных создателей, его можно считать их предшественником.

Свидетельством поразительной творческой активности Эйнштейна явилось появление всего через несколько недель после опубликования первой работы новой, посвященной броуновскому движению. В 1828 г. английский биолог Роберт Броун собирал пыльцу различных растений, которую он хранил в ампулах в виде жидкой суспензии. Под микроскопом зернышки казались подверженными непрерывному и длившемуся бесконечно действию какой-то беспорядочной силы. Предлагались различные объяснения этого явления, в том числе основанные на представлении о «живой» воде!

Растительное происхождение пыльцы не имеет никакого отношения к природе описанного явления. Эйнштейн в своей работе количественно показал, что в основе броуновского движения лежат непрерывные столкновения атомов жидкости с зернышками пыльцы. Дрожание, замеченное Броуном, являлось свидетельством атомной структуры вещества и беспорядочного движения атомов, предвосхищенного Максвеллом. Работа Эйнштейна запоздала для спасения Больцмана, морально искалеченного жесткой оппозицией школы Оствальда и Маха; тем не менее она ознаменовала собой окончательное признание существования атомов, которое нам уже кажется очевидным фактом. Трудно себе представить, что в конце прошлого века некоторые весьма авторитетные физические школы все еще отрицали этот факт.

Работа, посвященная броуновскому движению, представляет собой продолжение предыдущей и, по существу, тесно связана с фотоэлектрическим эффектом. В основе обоих явлений лежит теория флуктуаций. Если, например, подвесить в полости, заполненной излучением, зеркальце, то оно подвергнется непрерывным ударам фотонов, и его поведение также будет очень похоже на дрожание гранул пыльцы Броуна. На сходство этих явлений обратил внимание один Эйнштейн.

Третья работа Эйнштейна увидела свет все в том же пророческом 1905 г., и она возвестила о рождении теории относительности. Мы уже обсуждали основы этой теории. Здесь мне хотелось бы напомнить, что говорил один из первых толкователей писем Эйнштейна эпистолог (но и физик также) Джеральд Холтон. По его словам, Эйнштейн необычайно тонко и ясно улавливал аналогии между физическими явлениями, казавшимися совершенно разными, и представлял те несовершенства или асимметрии, которые возникали, когда эти аналогии не соблюдались до конца.

Столкнувшись с несовершенством теорий, Эйнштейн сначала анализировал ее недостатки, затем привлекал для их устранения какие-то новые общие принципы и заканчивал работу, обращая внимание на некоторые экспериментально наблюдаемые эффекты, которые следовали из этих принципов.

При создании теории относительности неприятность заключалась в существовании выделенных систем отсчета, покоящихся относительно эфира, в которых скорость распространения света в любую сторону была равна 300000 км/с. В других системах отсчета скорость движения относительно выделенных должна была зависеть от направления движения, что неизбежно следовало из закона сложения скоростей Галилея.

Эйнштейн очень четко представлял себе, что симметрия между различными наблюдателями, даже находящимися в относительном движении, играет принципиальную роль, гораздо более важную, чем закон сложения скоростей, который может быть соответствующим удобным способом видоизменен. Для подавляющего большинства современников Эйнштейна справедливым было обратное утверждение.

На самом деле свет при преследовании должен был все время уходить с неизменной скоростью, которая становилась таким образом универсальной постоянной, причем одной из важнейших в физике. С помощью простых интуитивных рассуждений, не требовавших привлечения сложной математики (не

выходя за рамки действий с квадратными уравнениями и простого дифференцирования), Эйнштейн развязал узел сложных аномалий и парадоксов, затемнявших теорию электромагнитного поля.

Иногда утверждают, что до Эйнштейна теорию относительности открыли Лоренц и Пуанкаре; я охотно уступаю право дискуссии на эту интересную тему историкам науки. Лично я сказал бы, что в работе 1905 г. теория предстает перед нами во всем своем великолепии и открывает такие новые горизонты физики, какие даже не просматриваются в работах Лоренца. Речь, наконец, идет о новом научном методе, нашедшем применение при исследовании любых физических явлений, а не только электромагнитных.

В том же году Эйнштейн опубликовал небольшую работу, в которой на основе всего нескольких исходных предположений пришел к выводу об эквивалентности массы и энергии, выражаемой теперь уже знаменитой формулой $E = mc^2$. Между тем научная общественность начинала интересоваться деятельностью Эйнштейна, не проявляя, правда, того единодушия, которого можно было бы ожидать. Кауфманн провел в 1906 г. некоторые опыты с целью проверки теории, называемой им теорией Лоренца-Эйнштейна, и в конце того же года заявил, что отсутствие определенных результатов в пользу теории ясно указывает на противоречие данной теории с экспериментом. Это были последние печально знаменитые слова, высказанные в таком духе!

Однако некоторые из «великих» (среди них был Планк) сознавали исключительную важность этих работ Эйнштейна, и он быстро обрел известность в научном мире.

За 1905 г. последовали годы тяжелой борьбы, которую Эйнштейн, по существу, вынужден был вести в двух направлениях. Во-первых, как мы уже упоминали, ему приходилось отстаивать свое представление о фотоне.

Второе направление борьбы было связано с созданием общей теории относительности, следующей естественным образом из специальной теории относительности при рассмотрении гравитационных полей. Подобные попытки развития теории предпринимались также Нордстремом и другими современниками Эйнштейна. Работа по построению этой теории отвлекала ученых от дебатов, захвативших весь мир физиков после создания модели атома Бором.

Наконец, после нескольких неудачных попыток увидел свет окончательный вариант теории 1916 г., обозначавший новую веху в науке и культуре нашего столетия.

В этой теории на современном математическом языке утверждаются некоторые простые физические принципы (как, например, принцип эквивалентности), имеющие в то же время поистине революционное значение.

Как было показано в этой работе, присутствие вещества определяет геометрию пространства таким же образом, как геометрические свойства пространства определяют движение вещества в нем.

Легко высказать приведенные слова, но гораздо труднее выразить их на практике с помощью соответствующих уравнений поля; для этой деятельности Эйнштейна очень полезным оказалось сотрудничество с математиком Марселем Гроссманом.

В 1917 г. Карл Шварцшильд получил решение уравнений поля Эйнштейна для массивного тела, имеющего сферическую симметрию. При этом он обобщил потенциал Ньютона и заложил основы теории черных дыр.

Столь же знаменателен интерес Эйнштейна к космологии. В опубликованной в 1917 г. статье он предложил модель Вселенной, в которой впервые упоминался космологический принцип. В то время из наблюдений мало что было известно о Вселенной; в частности, многие считали, следуя Шепли, что существует одна-единственная Галактика, наша, и что все остальное – это туманности, содержащиеся в ней. Не принималось во внимание, что межзвездная пыль поглощает излучение, и поэтому размеры Галактики казались значительно больше действительных: оценки радиуса Галактики были завышены примерно на 300000 световых лет.

В конце концов введение в строй больших телескопов привело к подтверждению идеи Куртиса, согласно которой спиральные туманности – это такие же настоящие галактики, как и наша, но чрезвычайно отдаленные.

Итак, Вселенная заполнена десятками миллиардов галактик, разбросанных в беспорядке, хотя в большом масштабе они распределены равномерно.

Эйнштейн предвосхитил этот результат, но не смог предвидеть расширения Вселенной, к чему пришел намного позже, в 1929 г., Хаббл. По мнению Эйнштейна, Вселенная должна была быть стационарна и притяжение звезд должно уравновешиваться каким-то космическим отталкиванием, специально введенным в уравнения поля (эту ошибку признавал сам Эйнштейн, не боявшийся опровергать самого себя).

В начале 30-х годов приход Гитлера к власти сделал невыносимой атмосферу научных исследований в Германии; в то напряженное время Эйнштейн навсегда оставил эту страну. Еще подтверждение отклонения световых лучей вблизи поверхности Солнца, полученное в 1919 г. экспедицией с участием Эддингтона, принесло Эйнштейну широчайшую известность. Оказавшись в центре горячих споров политического характера, он вопреки своей воле был возведен в ранг глашатая истины. Теперь же ухудшение

политической обстановки сделало необходимым переезд Эйнштейна в США, в Принстон, штат Нью Джерси, где он до конца жизни работал в Институте перспективных исследований.

Здесь Эйнштейн продолжал заниматься осуществлением своей мечты – созданием единой теории, которая объединила бы гравитационное и электромагнитное поля в одно гармоничное целое. По поводу этих попыток мы уже говорили достаточно. Нужно признать, что влияние эйнштейновских идей до сих пор сильно и недоступный пока мираж объединения манит современных физиков. Более того, за прошедшие полвека исследований активность в продвижении к окончательному синтезу возросла на основе глубокого обновления и расширения технических возможностей теории и эксперимента.

Наконец, нам остается проанализировать, как Эйнштейн относился к квантовой механике. К рождению квантовой механики привела деятельность не только одного исследователя, как было в случае теории относительности (с упомянутыми уже оговорками). Эйнштейн, однако, сыграл первостепенную роль и в создании квантовой механики. Дуализм волна – частица был понят лишь после открытия фотона; несколько «бесконечно далеко идущих» замечаний Эйнштейна, как говорил потом Шредингер, позволили ему построить свое знаменитое волновое уравнение, имея в качестве отправной точки работу Луи де Бройля. Остается любопытным историческим фактом то, что все три названных главных персонажа в истории создания квантовой механики отказались принять ее вероятностную интерпретацию, предложенную Борном. Эйнштейн резко выступал и против позиций Копенгагенской школы, считая квантовую механику только частью истины, не совершенной в своей основе. Он также полагал, что квантовая механика должна следовать из его будущих уравнений единого поля. Эйнштейн очень сдержанно относился к релятивистскому уравнению Дирака и, по сути, так и не принял современную теорию поля. Неопределенность квантовой механики его глубоко раздражала, и ее он также не принимал. Никакие доводы не могли разубедить его в том, что окончательная истина будет найдена в другом месте.

Как мы видим, Эйнштейн был человеком исключительно твердых убеждений, мыслящим совершенно независимо. Будь такая черта характера у другого человека, она могла бы иметь отрицательные последствия, а в другую историческую эпоху – привести к беде. Только поразительная научная интуиция позволяла Эйнштейну с предельной стойкостью поддерживать идеи, не имевшие в то время признания, но которые впоследствии приводили к перевороту в современной физике. Утверждение квантовой механики еще не означает, что в науке уже сказано последнее слово, будущее может преподнести нам всякие сюрпризы.

Слава, пришедшая к Эйнштейну, не уничтожила его чувство меры, присущую ему скромность. Хотя он наверняка сознавал, какое значение имели для научного мира его идеи, он всегда реалистически смотрел на вещи. Чувство юмора, никогда его не оставлявшее, спасало его от самомнения, охватывавшего других людей, ставших знаменитыми за гораздо менее значительные заслуги.

Мне самому не выпало счастья лично встречаться с Эйнштейном; когда в 1955 г. я впервые оказался в Принстоне, он был, увы, уже близок к смерти. Некоторые из его бывших сотрудников недавно вспоминали в Принстоне совместно прожитые годы и длинный путь, пройденный ими в направлении к объединенной теории. По воспоминаниям, Эйнштейн был личностью исключительно человеческой; он никогда не использовал свою славу, чтобы навязать свое мнение, и всегда был на равных со своими собеседниками.

Исследование деятельности Эйнштейна только начинается, но тем не менее уже теперь ясно, что Альберт Эйнштейн останется в истории как один из величайших деятелей науки и культуры всех времен, сравнимый с Ньютоном и Галилеем. Он был и остается популярным и у молодежи, что представляет собой редкость в наш век ложных мифов и развращенных вкусов.

4. Курт Гедель

Австрийский математик Курт Гедель родился в Брно (Чехословакия) на двадцать семь лет позже Эйнштейна и получил физическое и математическое образование в Венском университете. Его научные интересы частично пересекались с интересами Эйнштейна. Скромный математик-одиночка Гедель, в зрелом возрасте также приехавший в Принстонский институт перспективных исследований, внес важнейший вклад в основы математики, настолько революционный, что раздвинул границы этой дисциплины и оказал существенное влияние на общее мировоззрение и культуру 20 века.

Обязательный школьный курс геометрии во многом повторяет «Начала» Евклида, появившиеся около двух тысяч Лет тому назад; в них приведены некоторые утверждения (аксиомы) относительно свойств точек и прямых линий в плоскости, из которых следует справедливость всяких полезных и важных геометрических предположений (теорем). Одна из аксиом Евклида утверждает, что через две точки проходит одна и только одна прямая линия; другая аксиома касается параллельных прямых и т.д. По своей природе аксиомы просты и недоказуемы, их справедливость принимается как нечто очевидное и не требующее доказательств. Интерес к деятельности Евклида вызван тем, что он сумел представить всю геометрию с помощью небольшого числа верных и основополагающих утверждений, выраженных весьма ясно и в лаконичной форме.

Успех метода Евклида побудил математиков последовать примеру великого грека в других разделах науки о числах. Один из этих математиков, житель Пьемонта Джузеппе Пеано, впервые дал формулировку арифметики, используя аксиомы, казавшиеся до смешного очевидными (существует нуль, за каждым числом следует еще число...), но на самом деле удивительно исчерпывающие. Однако ни сам Пеано, ни Гильберт и его школа, продолжившие работу, начатую пьемонтцем, не смогли доказать полноту и состоятельность аксиом Пеано, да и других подобных утверждений (я прошу прощения за предельно упрощенный рассказ о том интересном времени). «Полнота» указывает на то, что любая настоящая теорема арифметики может быть выведена из этих аксиом; «состоятельность» предполагает отсутствие парадоксов, когда могут быть выведены как некоторые утверждения, так и утверждения, противоположные им.

Какими были бы для математической мысли последствия успеха Гильберта и его школы? Если бы, как считал Гильберт, вся математика сводилась к системе аксиом, то эти последние можно было бы ввести в вычислительную машину, способную по нашему приказу напечатать любые утверждения, следующие из этих аксиом. При этом все возможные теоремы выдавались бы машиной, что делало бы работу математика бессмысленной, сводя ее к роли оператора вычислительного центра. Был бы создан математический робот, мы достигли бы вершины абстрактной логики и имели электронного оракула, способного ответить на любой вопрос.

Но, даже если отвлечься от затрат бумаги, необходимой для того, чтобы напечатать миллионы ненужных (хотя и верных) теорем, дойти до вершины все равно не удалось бы. Появившаяся в 1931 г. работа Геделя, произведя эффект разорвавшейся интеллектуальной бомбы, заставила фон Неймана прервать курс лекций в Геттингене, а Гильберта прекратить работу над своей программой. Гедель утверждал, что состоятельность и полноту какой-либо логической системы можно установить, погружая исходную систему в систему более развернутую. Правда, Гедель показал, что при этом проблема состоятельности и полноты становится более сложной из-за усложнения логического языка, что приводит к спирали усложнений, к нескончаемой логической эскалации. Именно это и происходит также, когда человеческий разум занят своим привычным делом – размышлением.

Машина, работа которой основана на аксиомах Пеано, окажется неспособной ответить на вполне определенную последовательность вопросов. Но каковы эти вопросы, Гедель не сообщает. Во всяком случае, можно предположить, что неразрешимой в геделевском смысле является следующая головоломка. Построим последовательность целых чисел, начинающуюся с любого целого числа, причем каждое последующее число должно быть равно половине предыдущего, если оно четное, или предыдущему, умноженному на три и сложенному затем с единицей, если это предыдущее число нечетное. Повторяя процедуру вычисления последующих чисел, мы в конце концов построим всю последовательность. Если начать с цифры 5, то мы получим следующую последовательность: 5, 16, 8, 4, 2, 1. Итак, мы пришли к единице. Оказывается, что независимо от числа, с которого начинается последовательность, мы всегда приходим к единице, хотя доказательства этого факта не существует. Возможно, это связано с нашей неспособностью найти его, но может быть, указывает на недостатки, присущие фундаментальным основам арифметики.

Результат, полученный Геделем, выходит за пределы узких рамок арифметики, оказывая влияние также на кибернетику. Немного времени спустя после открытия Геделя математик Тьюринг заметил, что все вычислительные машины могут быть заменены всего одним простейшим и даже очень медленным калькулятором, так как, если не ограничивать используемую память, такой калькулятор воспринимает программы произвольной длины и сложности. В принципе можно составить бесчисленное множество таких программ, но, к счастью, их можно объединить и хранить вместе и составить полный их перечень. Не все программы будут полезны, а из-за некоторых машина может даже входить в режим непрерывно и безостановочно повторяющихся вычислений. Если же все работает нормально, то в соответствии с приказами в программе машина в ответ на введенное в нее число печатает другое, т.е. производит вычисления: например, может напечатать квадрат какого-нибудь числа, удвоить его или вывести число, следующее за числом, введенным первоначально. В общем случае машина может вычислять невероятно сложные функции введенного в нее исходного числа.

По определению функции, вычисляемые «машиной Тьюринга», являются «вычислимыми», поэтому инструкции по их вычислению могут быть переданы разным машинам без опасения, что возникнут ошибки или неясности. Вместе с тем существуют функции, не поддающиеся вычислению, более того, они составляют подавляющее большинство, хотя трудно дать определение такой функции. Как ни странно, но пример невычислимой функции следует прямо из теории «машины Тьюринга». Присвоим значение «единица» целому числу, соответствующему нормально работающей машине; «нуль», напротив, будет соответствовать машине, вошедшей в режим безостановочных повторных вычислений. Таким образом мы задали невычислимую функцию, и доказательство этого повторяет доказательство, данное Геделем для логических систем. Зная эту функцию, мы можем сказать заранее, не прибегая к запуску в работу самой программы, остановится ли соответствующая машина или будет работать вхолостую.

Это не абстрактный вопрос: было бы очень удобно знать заранее, работает ли программа или нет, прежде чем запускать ее в машину. Результат Тьюринга подтвердил то, что уже чувствовали интуитивно пользователи машин, а именно, что нет способа определить с уверенностью, работает ли программа, кроме как испытать ее на практике.

Всегда ли остается неизвестной функция, не поддающаяся вычислению? Ответ Геделя прост: даже если вычислены первые сто или тысяча значений этой функции, мы все равно ничего не узнаем о том, как вычислить последующее значение, так что требуются человеческий разум и творческие усилия, чтобы выйти из жестких рамок программирования для вычислительной машины. Снова и снова мы убеждаемся в том, что вычислительная машина удивительно прилежна и вместе с тем столь же глупа: она выполняет вычисления, не думая, только по предварительно составленной подробной инструкции. Конечно, может оказаться, что когда-нибудь будут созданы новые, более умные роботы, подобные описанным в книгах Айзека Азимова.

Тем, кто упрекал Геделя в разрушении целостности фундамента математики, ученый всегда отвечал, что, по существу, основы остались столь же незыблемыми, как и прежде, а его теорема просто привела к переоценке роли интуиции и личной инициативы в одной из областей науки, в той, которой управляют железные законы логики, оставляющие, казалось бы, мало места для указанных достоинств. Несмотря на уверения идеалистов, математика оказалась настоящим искусством, и достойный преклонения пример творческого служения этому искусству дал сам Гедель в своих холодных, написанных только по существу дела работах.

Глава 5. Невероятная история: открытие вечного движения

В занимательной книге Артура Орд-Хьюма «Вечное движение» рассказывается об истории идеи вечного движения и о том, как в течение столетий целые толпы непризнанных изобретателей были одержимы мыслями о постройке вечного двигателя. Бессмысленно в этих случаях апеллировать к закону сохранения энергии: великие «запреты» физики никогда не вызывали симпатии. Также бессмысленно, например, говорить людям, играющим в лотерею, что они обязательно должны проигрывать (в среднем), чтобы организация лотерей приносила государству доход. Все равно мы будем встречать изобретателей, уверенных в близости окончательного решения, и рассерженных игроков, убежденных в том, что сумеют выиграть, используя самый последний вариант некоей «математической» системы. Я сам встречал трех «вечных» фантазеров, с другими общались знакомые мне журналисты. Как правило, речь идет о механизмах, использующих те или иные виды эксцентриков. Орфиреус, настоящее имя которого было Иоганн Эрнст Элиас Бесслер (1680...1745), даже построил такой «вечный» двигатель, с одинаковой легкостью вводивший в заблуждение королей, обывателей и профессоров, среди которых, в частности, был профессор Гравезанд из Лейдена, в хвалебных тонах написавший о двигателе Ньютону. Однако и машина Орфиреуса была разрушена.

В книге Орда-Хьюма перед нами проходит забавная галерея мошенников и изобличенных изобретателей, погубленных своей одержимостью.

Вечным движением первого рода называется такой процесс, в котором нарушается закон сохранения энергии. Иными словами, за счет такого движения можно получить что-то из ничего. Менее известным представляется вечное движение второго рода, нарушающее второе начало термодинамики. Это так же невозможно, как и нарушение закона сохранения энергии, хотя здесь теория труднее для понимания.

Вечное движение второго рода было бы возможным, если бы все тепло в металлическом стержне могло внезапно перейти в один раскалившийся при этом конец, оставив другой совсем холодным. В этом случае в середину стержня можно было бы поместить тепловую машину (паровую турбину). Аналогичным образом можно было бы извлекать огромное количество энергии, содержащееся в морях, всякий раз, когда в воде спонтанно создавалась бы разность температур. Мы действительно думаем, как использовать разность температур между теплой водой в приповерхностном слое и холодной водой глубин для создания больших электростанций. Однако никоим образом нельзя преодолеть термодинамические ограничения, накладываемые на коэффициент полезного действия, который становится равным нулю, когда температура повсюду выравнивается. Напротив, возможность движения второго рода означала бы, что можно извлекать всю энергию из морей или из других резервуаров независимо от распределения температуры в жидкости.

Эти претензии производят менее тягостное впечатление, чем непосредственное производство энергии из ничего, но они столь же неприемлемы. Теплота представляет собой беспорядочную энергию хаотического движения атомов. Для практических же применений требуется упорядоченная энергия, создаваемая атомами колеса или поршня, перемещающимися в одном направлении, или, во всяком случае, если движения этих атомов взаимосвязаны. Невозможно представить, чтобы энергия беспорядочного движения могла бы вдруг превратиться в энергию упорядоченного механического движения: энтропия, т.е. беспорядок, всегда растет. Это неоспоримый экспериментальный факт, получивший теоретическое обоснование в виде так называемой «Н-теоремы» Больцмана, от изложения которой мы избавим читателя.

Речь идет об очередном «запрете», хотя и менее жестком, но вызвавшем также замечания критиков.

Из изобретателей вечного движения второго рода мы упомянем Гэмджи, которым в конце прошлого столетия заинтересовался даже главный инженер военно-морского департамента США. На этом я закончу краткий обзор вечного движения. Прошу только кандидатов в изобретатели не обращаться ко мне для получения оценки своей деятельности. Рассказ-дневник, приводимый ниже, дает представление о том психологическом ударе, который был бы нанесен физикам, если бы вечный двигатель действительно был построен путем усовершенствования какого-нибудь из традиционных устройств. Учитывая, что события, описанные в рассказе, совершенно невероятны, я поместил его в конце книги, хотя его содержание безусловно связано с тем, что говорилось в главе об энтропии.

15 февраля. Пошел в Культурный центр, чтобы рассказать о физике высоких энергий. Уровень аудитории не позволял вдаваться в технические подробности. В конце, как всегда, вскочил этот зануда Сантедду, который заявил, что он «почти» построил вечный двигатель и что всю физику необходимо пересмотреть. Я ему вежливо ответил, что, по моему мнению, он ошибается. Тут он начал кричать, что, хотя я его считаю идиотом, мы еще увидим, на что он способен. Биануччи, пытавшемуся его успокоить, пришла в голову блестящая мысль передать слово Куаротти, философу старой гвардии. К сожалению, результат оказался плачевным. Куаротти начал свою речь с того, что, мол, любые научные результаты должны тщательно обсуждаться философами, прежде чем их можно будет считать установленными. Затем последовала длинная нудная проповедь, в которой он обвинял нас, физиков, в пренебрежении духовными ценностями. Несчастный шут! В конце концов Сантедду, поняв, что ему не удастся больше вступить в разговор, вышел, выкрикнув угрозы. Признаться, его фанатичный взгляд привел меня в ужас.

20 февраля. Продолжаю получать письма от Сантедду, в которых он заявляет, что получил сенсационные результаты; все это меня беспокоит, общий наглый тон писем колеблется между фанатизмом и торжеством. Сантедду нападает на физику и закон сохранения энергии, повинный в ограничении свободы личности. Он объединяет утверждения, взятые напрокат у Куаротти, и оскорбления типа «... вы равным счетом ничего не поняли в моих открытиях и умрете, так ничего и не поняв...» Нет недостатка и в предостережениях в духе мафии («о вас я еще вспомню в подходящий момент...»). Я очень надеюсь, что он действительно уйдет с головой в процесс изготовления двигателя и тогда окажется в одной компании со всеми сумасшедшими, которые уже много веков бьются над его созданием.

3 марта. Встретил Куаротти в коридорах университета. Он со мной поздоровался холодно: наверно, сознает, что я его считаю шутком, и притом надоедливый. Он произнес странную речь, в которой призывал меня обратить пристальное внимание на Сантедду, причем говорил раздраженным тоном философа, умудренного и знающего больше других о том, что творится в мире. Неужели есть связь между Куаротти и Сантедду? У меня зародилось подозрение. В своих письмах Сантедду, бывший пастух с Сардинии, бывший механик фирмы «Фиат», а ныне владелец пиццерии на одной из центральных улиц города, непрерывно цитирует Гегеля и Хайдеггера. Я начинаю думать, что это Куаротти вскружил ему голову.

15 марта. В «Вечерней газете» появилось интервью с Сантедду, в котором он заявляет, что создал вечный двигатель. Меня это вывело из себя, я принес газету в институт и показал коллегам. Мы решили написать главному редактору, что не следовало бы попадаться в столь неприкрытые ловушки.

20 марта. Главный редактор «Вечерней газеты» ответил нам письмом общего характера, в котором, хотя и в деликатной форме, обвинил нас в том, что мы недостаточно доброжелательно относимся к новым идеям. По существу, он утверждал, если я его правильно понял, что мы, ученые, отворачиваемся от окружающей действительности. В то время как мы обескураженные, обсуждали письмо, Бонаццола принес еще один номер «Вечерки». На третьей странице опубликована длинная статья Куаротти, в которой он жалуется, что «неприкасаемые» подвергаются остракизму со стороны официальной науки (он совершенно неуместно цитирует одновременно Сантедду и Галуа). Ученых он обвиняет в нескромности. Весьма прозрачны намеки лично на меня. Друзья меня успокаивают и утешают. На самом деле я взбешен. Мне казалось, что после тридцати лет работы я имею право на более уважительное отношение к своей особе.

21 марта. Вещцолли, журналист из «Вечерней газеты», позвонил мне и пригласил посетить публичную демонстрацию вечного двигателя Сантедду. Я ответил, что не могу принять участие в подобном представлении, но Вещцолли продолжал настаивать и обещал, что все мои высказывания будут полностью напечатаны. Я ему предложил пригласить Куаротти. Это было ошибкой: Куаротти уже принял приглашение и, более того, собирается произнести философское вступление по поводу изобретения. Итак, я отклоняю приглашение и вешаю трубку. Через десять минут звонит ректор и умоляет меня пойти на демонстрацию двигателя. Я ошеломлен. Ректор явно смущен и в тщательно подобранных обтекаемых выражениях дает мне понять, что в «открытии» заинтересованы военные. Я вдруг вспоминаю, что брат Куаротти – генерал авиации. Поддаюсь давлению: если военные так хотят сыграть эту жалкую роль – это их дело; ладно уж, пойду на демонстрацию. Но надо быть осторожным.

24 марта. Я разбит. Выступление Сантедду было ошеломляющим. Все происходило в огромной комнате на телевидении в присутствии стаи журналистов, фотографов, полицейских и военных, как в штатском, так и в форме, а также очаровательной блондинки – ведущей передачи. Все взмокли под лучами

мощных юпитеров. «Машина» Сантедду, закрытая занавеской, находилась на маленькой сцене в центре зала. Я взял с собой Трикоми: он умеет мгновенно разгадывать любые фокусы. Куаротти говорил полчаса, предвещая новую эру в науке; он заявил, что произошло «историческое событие». Затем выступил торжествующий Сантедду, в подражание Куаротти употребляя всякие ученые слова, в том числе и те, значение и произношение которых он не вполне усвоил.

Я уже собрался было уйти с этой надоевшей клоунады, как Сантедду развязал узел, полотнище сползло и открыло машину Архимеда Пифагорейского – сложнейшего вида разборное колесо, снабженное спицами с большими металлическими шариками на концах. Сантедду дал толчок, и адская игрушка с оглушительным грохотом пришла в движение, все ускоряясь, пока мне не стало казаться, что она вот-вот развалится. Я сильно побледнел, и этим воспользовались присутствующие фотографы. Я так и был сфотографирован с выражением крайнего смущения на лице.

Генерал Куаротти оставался невозмутимым. Трикоми, воспользовавшись суматохой, стал с любопытством осматривать машину, заглядывая под пьедестал и трогая кабели, лежавшие на полу. Вдруг в одном из них произошел пробой, мы увидели сноп искр, после чего оказались в кромешной темноте. Сантедду начал кричать о саботаже, Куаротти, столкнувшись с полицейскими, упал прямо на машину. Когда, наконец, вновь зажглось освещение, Куаротти лежал на полу мертвенно бледный, а машина продолжала крутиться с невообразимым шумом. Пока я пытался ответить на вопрос какого-то журналиста, Сантедду, едва удерживаемый карабинером, рвался на меня напасть. Трикоми уже исчез, да и я постарался убраться как можно скорее.

25 марта. Все газеты вышли со статьями, восхваляющими открытие Сантедду. Не обошлось и без обычной низкопробной историко-философской стряпни Куаротти; на этот раз он выгащил даже «психизм» материи. На снимке я изображен с закрытыми глазами и раскрытым от изумления ртом. Под фотографией подпись: «Физике пришел конец. Ядерные ученые смиряются. Будет ли закрыт ЦЕРН?» Я бросился к телефону, чтобы отыскать иллюзиониста Джека Ребби, как раз в эти дни находившегося в Риме. Мне удалось найти его с помощью своих друзей в американском посольстве. Джек ничего не знает о вечном движении. Я ему объяснил, что он должен приехать в Турин, чтобы развенчать одного мошенника, но убедить его до конца мне не удалось. Я стал настаивать, что он должен это сделать во имя культуры, истины и т.д. Он мне ответил, что приедет, только если речь идет о явлениях, имеющих отношение к парапсихологии, и что вечное движение находится вне его интересов. Я так и не смог сдвинуть его с места.

27 марта. Трикоми пришел ко мне на работу с фотографиями, тайно снятыми им во время сборища на телевидении. Детали колеса видны совершенно отчетливо. Вызываю Тенконе, начальника мастерских, и прошу по возможности скорее построить точную копию машины, чего бы это ни стоило. Он дает обещание воспроизвести чертово колесо за несколько дней.

29 марта. Я сильно нервничаю в ожидании окончания работы Тенконе. По техническим причинам наше колесо будет несколько тяжелее. После выступления на телевидении военные ввели строжайшую цензуру на все, что касается вечного движения. Из полицейского участка мне сообщили, что впредь я буду находиться под охраной, чтобы избежать утечки информации. Одно только меня утешает: теперь военные под разными предлогами держат Сантедду под замком.

30 марта. Продолжаю изучать фотографии машины Сантедду. Речь идет о хорошо известном варианте вечного двигателя, имеющем единственный недостаток: он не работает. Спицы на шарнирах должны непрерывно крутиться и опускаться таким образом, чтобы шаров с левой стороны оказывалось больше, чем справа; казалось бы, такое колесо должно прийти в движение. Я говорю «казалось бы», потому что опускающаяся спица неизбежно оказывает на колесо обратное действие, сводящее к нулю весь эффект. Еще немного терпения и вариант Сантедду тоже окажется ложным. Я уверен, что где-то у него спрятан электромотор.

1 апреля. Наконец, после многих дней треволнений иду в институт успокоенный. Теперь мы разоблачим уловку Сантедду. Тенконе мне сообщает по телефону, что машина собрана на нижнем этаже. Иду вниз, и ко мне тотчас подходит чрезвычайно бледный Тенконе. Он делает попытку что-то мне сказать, но его прерывает высокое жужжание, переходящее в настоящий рев. Большой кусок свинца пролетает через мастерскую, серьезно раня Трикоми. Слышится глухой треск ломающегося шкафа. Несколько минут я не могу произнести ни слова, мысли путаются в голове, я ошеломлен. Я даже не прихожу на помощь Трикоми, рыдающему на полу. Тенконе в состоянии смятения рассматривает полуразрушенную машину, которая продолжает шевелиться, как живая. Я его спрашиваю, не подсоединил ли он электромотор, В ответ он начинает ругать меня за то, что я заставил его заниматься такой опасной штукой.

Неужели вечный двигатель Сантедду все же работает?! Сознание этого факта подействовало на меня, как удар молота. Неужели все ошиблись: Лагранж, Галилей, Ньютон, Эйнштейн? Я убежал. Должно быть, на мне лица не было.

5 апреля. Уже два дня, как я не прихожу в институт, потому что нет сил преодолеть себя. Трикоми чувствует себя лучше, он со временем поправится. Цензура военных оказалась бессильной: кто-то уже продал чертежи «заинтересованным» лицам. Город полон иностранных журналистов. Сантедду,

освобожденный по настойчивому требованию народа и газет, раздаёт победоносные интервью; он потребовал Нобелевскую премию и мою кафедру в Турине. Кретин! Он даже не знает, что по уставу меня нельзя ни уволить, ни перевести на другую работу. У меня нет сил включить телевизор. Я не беру в руки газет...

15 апреля. Итак, главным событием дня является изобретение Сантедду. Фирма «Фиат» даже собирается установить такие двигатели в автомобилях. Немцы и поляки бранятся между собой, оспаривая приоритет Сантедду, кто-то утверждает, что вечный двигатель полностью повторяет машину Орфиреуса, то ли немецкого, то ли польского изобретателя восемнадцатого века. Полагают, что его детище случайно оказалось в целости и сохранности, хотя считалось, что оно уничтожено по приказу герцога Гессенского. Может быть, оригинал машины Орфиреуса был найден Куаротти, который затем передал его Сантедду? Даже если все произошло именно так, я не нахожу повода для утешения и чувствую себя жалким и ненужным пенсионером. Сантедду претендует на роль величайшего ученого двадцатого века, превзошедшего Эйнштейна. Он требует закрыть ЦЕРН или превратить его в центр по исследованию вечного движения и «психизма» материи.

Решаю прогуляться в одиночестве в городском парке, где встречаю Джузеппе, бывшего служащего, вышедшего на пенсию. Он тут же начинает разговор и спрашивает, доволен ли я новым изобретением. Я отвечаю не сразу. Внезапно нас отвлекает странное зрелище. На поляне в парке поднимается вверх разноцветное облако самолетиков, запущенных стайкой ребятишек. Самолетики издаёт необычное жужжание. Один из них сталкивается с деревом и падает на землю, продолжая при этом метаться. Я поднимаю его и мной овладевает горькое чувство. Там, где должен быть винт, я вижу миниатюрную копию колеса Сантедду, выполненную очень остроумным образом из пластмассы. Джузеппе, видя мое лицо, спрашивает о моем здоровье, и я, еле передвигая ноги, удаляюсь. Какая-то дама восторженно комментирует увиденное зрелище, Это действительно конец.

Оглавление

Предисловие редактора перевода	1
Предисловие автора к русскому изданию	2
Предисловие к итальянскому изданию	2
Глава 1. Относительность и космология	3
1. Относительность: вводные замечания	3
Принцип относительности Галилея	3
Опыт Майкельсона и Морли	3
Принцип относительности Эйнштейна	4
Кажущиеся парадоксы	4
Эквивалентность массы и энергии	5
Принцип эквивалентности	6
Кривизна пространства	6
Развитие общей теории относительности	7
2. Парадокс близнецов	7
3. Свет и гравитация	9
Принцип эквивалентности	9
Искривление луча света гравитационным полем	9
Гравитация влияет на течение времени	10
В черной дыре	11
4. Черные дыры	11
Предвидение Лапласа	11
Вклад общей теории относительности	12
Течение времени рядом с черной дырой	12
5. Взгляд на Вселенную	12
Галактики	13
В центре галактик	13
Черные дыры превращают массу в энергию	14
6. Гравитационные линзы	14
Квазары	14
Эффект линзы	15
Другие наблюдательные данные о галактических линзах	15
7. Введение в космологию	15
Космические масштабы	16
Космологический принцип	16
Расширение Вселенной	17
Искривление Вселенной	17
Вслед за началом	18
8. Большой взрыв	18
Парадокс Ольберса	18
Закон Хаббла	19
Интуитивные модели расширения Вселенной	19
Недостающая масса	20
Хроника первых миллионов лет	20
Реликтовое излучение	21
Роль дейтерия	21
Образование галактик	22
Замкнута или открыта Вселенная?	22
9. Нейтрино и космология	22
Нейтрино	23
Имеют ли нейтрино массу?	23
Реликтовые нейтрино	23
10. Космический корабль будущего	24
Проект «Орион»	24

Другие варианты запуска космического корабля.....	25
Что увидели бы астронавты?	25
Течение времени	26
Глава 2. Астрофизика и Солнечная система	26
1. Образование Солнечной системы	26
Теории прошлого	27
Рождение Солнца.....	27
Образование планет.....	27
2. Введение в астрофизику.....	28
Состав Солнца.....	28
Эволюция Солнца	29
Магнитное поле	29
Классификация звезд.....	29
Самые близкие к нам звезды	30
3. Сверхновые.....	30
«Звезда-гостя», появившаяся в 1054 г.	30
Эволюция звезд.....	31
Гравитационный коллапс.....	31
Пульсары	32
Локальные эффекты, связанные со сверхновыми	

5. Ядерные силы.....	46
Атомы	46
Фотоны.....	46
Вероятностное описание.....	46
Ядра и ядерные реакции.....	47
Деление	47
Мезоны Юкавы	48
Частицы и античастицы	48
6. Элементарные частицы	48
Семейства частиц.....	48
SU-3-симметрия	49
Кварки.....	49
Глюоны	50
Критика понятия элементарности.....	50
Слабые взаимодействия	50
Нарушение симметрий.....	51
Значение сил разных типов.....	51
Нарушение симметрии относительно инверсии времени	51
Обращение времени в космологии	51
7. На пути к единой теории?.....	52
Вклад Эйнштейна	52
Гауссова кривизна	53
Кривизна и материя	53
Параллельный перенос Леви-Чивита.....	54
Теория Вейля.....	54
8. Сверхтекучесть	55
Газ гелий.....	55
Роль соотношения неопределенности	56
Сверхтекучесть	56
Статистика Бозе-Эйнштейна	56
Взаимодействие между атомами гелия	57
Волны и фононы	57
Вихри и вязкость.....	58
Эффект фонтанирования.....	58
9. Сверхпроводимость	59
Открытие сверхпроводимости.....	59
Механизм проводимости	59
Механизм сверхпроводимости	59
Эффекты Мейснера-Оксенфельда.....	60
10. Энтропия.....	61
Начала термодинамики	61
Смысл энтропии.....	61
Локальное уменьшение энтропии	61
Энергетическая проблема	62
Гипотеза Пригожина	62
Глава 4. К портретам ученых	63
1. Галилео Галилей	63
2. Джеймс Кларк Максвелл.....	63
3. Альберт Эйнштейн	65
4. Курт Гедель	68
Глава 5. Невероятная история: открытие вечного движения	70