

Ирина Львовна Радунская

Единство

Аннотация

"Единство" выводит читателя на современный уровень духовной зрелости человеческого интеллекта: осознание единства природы, а следовательно, единства законов природы. Следствие - возможность штурма очередных проблем: привлечением методов и знаний, добытых в других областях науки.

ВВЕДЕНИЕ

*Наука едина потому,
что едина природа.*

Автор

Природа... Все существующее входит в это всеобъемлющее понятие. В том числе человек, познающий окружающий мир.

История человечества, развитие его познавательной способности сопровождались расширением и уточнением научных понятий, в том числе такого фундаментального понятия, как природа.

Вряд ли можно согласиться с мнением некоторых экологов, что «природа» — это просто синоним понятия «дикая природа», некая первозданная среда, еще не испытывавшая воздействия человека, не тронутая земледелием, животноводством, промышленностью.

В древности человек не отделял себя от окружающего мира, не противопоставлял себя и себе подобных остальной природе. Тогда каждый ученый изучал все и учил всему. Но постепенно, по мере увеличения объема знаний произошло разделение интересов. Оно совпало с формированием рабовладельческих обществ. Неравенство между людьми породило неравенство профессий. Возникли понятия высших и низших наук.

Высшие науки — те, что мы теперь относим к гуманитарным областям знания и искусству, а также грамматика — продукт «чистого» разума, стихосложение, риторика. Геометрия и арифметика родились на почве реальности, когда землемер размечал участки земли шагами, а торговец по пальцам считал товар. Постепенно они стали даже более абстрактными, чем правила стихосложения, и были зачислены в ранг высших наук.

Медицина, механика, архитектура и то, что теперь относится к естественным наукам, наукам о природе, и к технике, были провозглашены низшими науками, занятием, недостойным свободного гражданина. Это считалось уделом рабов и простолюдинов, «пошлым ремеслом».

Лишь на заре эпохи Возрождения вновь появился универсал, который своим примером мог бы разрушить эти предрассудки, ликвидировать искусственные границы между областями знания. Леонардо да Винчи не получил систематического образования, но достиг величайших высот во всех областях науки и в искусстве. Но и он не уничтожил предвзятости. Дифференциация наук и специализация ученых все более углублялись. Коперник, Браге, Кеплер посвятили себя астрономии. Тарталья, Виетта и другие — математике.

Последним универсалом был Ломоносов, одинаково преуспевавший в естественных и гуманитарных науках, в технике и литературе, в организации науки.

К тому времени величайшие ученые стали на путь специализации. Галилей занимался преимущественно механикой и астрономией. Ньютон ограничился физикой, математикой и оптикой. Гюйгенс — механикой и оптикой. Лейбниц отдавал все силы математике. Лавуазье — химии...

Так оно шло и породило горькую поговорку: «Узкий специалист знает всё ни о чем, а широкий специалист не знает ничего, но обо всем».

В наши дни стало очевидно, что искусственные границы препятствуют развитию знаний. Природа многогранна, ее можно и нужно изучать с различных сторон. Но она едина, поэтому едина и наука. Все попытки пренебречь таким единством тормозят прогресс.

Книга «Единство» ставит целью показать наиболее яркие перекрестные связи между различными дисциплинами, связи, которые привели к важнейшим открытиям современности.

Читатель узнает, как периодическая таблица химических элементов — величайшее творение Менделеева (посвятившего себя химии, в его время весьма обособленной, специальной науке) — оказалась неразрывно связанной с космологией и ядерной физикой, термодинамикой и теорией элементарных частиц. Творец периодической таблицы элементов, выражающей один из основополагающих законов природы, не мог знать, куда приведет дорога его поисков. Не мог предположить и того, что не химики, а физики XX века подарят миру новый элемент и назовут его менделевием. И это новое вещество, как и другие неведомые химикам элементы тяжелее урана — кюриев, эйнштейний, фермий, лоуренсий, курчатовий, нильсборий, — будет получено искусственно. Но не с помощью химической реакции, этого давнего, испытанного инструмента в получении новых веществ, а «изготовлено» на основе рекомендаций квантовой физики. Мечта алхимиков осуществилась...

Читатель наверняка будет удивлен, узнав, что многие важные сведения о свойствах элементарных частиц сегодня получены не физиками на основе экспериментов с этими частицами, а космологами, сумевшими заглянуть в далекое прошлое, отстоящее от нас на миллиарды лет. Там они познакомились с биографией кирпичиков мироздания.

Мы сосредоточимся на космологии, науке о Вселенной, имеющей огромное философское значение и одновременно превратившейся в своеобразную физическую лабораторию.

Говоря о лаборатории, обычно имеют в виду помещение или ряд помещений, оборудованных для проведения исследований в какой-либо конкретной области знания — физике, химии, биологии, оптике, генетике... И вдруг в качестве лабораторного полигона одна из наук — космология?

Первоначальной задачей космологии было изучение строения Вселенной. Она основывалась на материале наблюдательной астрономии, изучающей положение и движение небесных тел. Затем, после создания спектрального анализа и рождения астрофизики, космология приобрела возможность изучать эволюцию Вселенной. Для этого пришлось привлечь различные разделы физики и химии, ибо развитие Вселенной складывается из множества взаимосвязанных процессов, в которых участвуют элементарные частицы, атомы и молекулы.

С середины XX века выяснилось, что космология — наука о макрокосмосе, рассматриваемом во всей его безграничности, — тесным образом связана с наукой о микрокосмосе, изучающей процессы, протекающие в глубинах атомных ядер.

Космология оказалась способной не только объяснить то, что ранее считалось непонятным, но и делать предсказания. И эти предсказания подтверждаются специальными опытами. Такая способность — один из главных критериев правильности научной теории.

Совсем недавно, когда двадцатый век вступил в свою третью четверть, космология достигла столь высокого уровня развития, что с ее помощью можно проверять

Предсказания теории элементарных частиц — например, о свойствах ядерных частиц, которые нельзя подвергнуть контролю в наилучших современных лабораториях и в лабораториях обозримого будущего.

Так космология стала лабораторией физики.

Мы встретимся и с другими убедительными подтверждениями единства науки, изучающей природу.

Рассматривая под этим углом зрения важнейшие достижения сегодняшнего дня, нельзя обойти вниманием удивительное явление, получившее название «странный аттрактор». Впервые он появился перед учеными при изучении атмосферы. В нем как бы воплотились древние злые духи, стремящиеся ввергнуть мир в хаос, — вот когда стало ясно, почему так трудна задача предсказания погоды!

Встретившись со странным аттрактором в земной атмосфере, ученые сумели разглядеть его козни в самых разнообразных явлениях природы и в некоторых технических системах. Он появлялся почти во всех случаях, ранее казавшихся следствием неправильных расчетов или случайных воздействий. Выяснилось, что он повинен в опасных для человека нарушениях сердечного ритма, вызывает фибрилляции, с которыми так трудно бороться медикам. Нарушает работу некоторых машин и радиоприемников. Словом, сфера его деятельности обширна и затрагивает интересы медицины и метеорологии, термодинамики и биологии, радиотехники и теории механизмов и машин...

Осознав нрав странного аттрактора, представители столь полярных наук, объединившись, сумели укротить его и поставить на службу человечеству. Однако подробно речь о нем впереди.

Познакомившись с важнейшими открытиями современности, читатель подойдет к пониманию важнейшего положения материалистической философии о единстве законов, действующих в природе и отраженных в науке, этом слепке с законов природы. Читатель убедится: в единстве законов, общих для самых различных явлений природы, заключены необозримые резервы для прогресса науки и техники.

Сегодня набирает силу особый метод исследования природы, основанный на глубокой общности процессов, внешне весьма разных, относящихся к разнообразным областям науки, но допускающих описание их свойств при помощи сходных математических уравнений.

Ученый, воспринявший этот метод мышления и обладающий опытом в одной из конкретных областей знания, способен быстро и успешно входить в другие, часто весьма удаленные научные проблемы и более легко получать в них важные результаты.

Книга «Единство» ставит целью воспитание современного научного мышления у молодого человека, только вступающего в самостоятельную жизнь, чтобы помочь ему шагнуть выше и дальше предшественников на пути прогресса.

ВЕЛИКИЙ ЗАКОН

Главная цель естественных наук — раскрывать единство сил природы.

Л. Больцман

ГЛАВА 1 **Симметрия и химия**

Когда речь заходит о симметрии, в памяти сразу возникают четкие формы листьев, цветов, кружевных узоров, архитектурных сооружений, словом, бросающаяся в глаза внешняя симметрия предметов. Мало кто задумывается о том, что симметрия здания зачастую следствие многократного повторения одинаковых квартир. А симметрия кристалла основывается на внутреннем порядке взаимного расположения атомов, ионов, молекул.

Законы симметрии играют ведущую роль в понимании строения веществ. Пожалуй, первым, осознавшим, что внешний порядок в природных явлениях определяется непознанным внутренним порядком, был великий химик Дмитрий Иванович Менделеев.

Знание не является эквивалентом науки. Началом превращения знания в науку, в научное знание, является классификация — упорядочение признаков предметов и явлений. Далее идет выявление связи между признаками и сущностью.

Если придерживаться этой точки зрения, то первый шаг, превращающий химию в науку, сделал гениальный универсал Михаил Васильевич Ломоносов. Он понял, что частицы сложных тел — корпускулы — состоят из элементов — молекул, а те в свою очередь образованы первичными элементами — атомами. Ломоносов сумел заглянуть в глубинную суть вещей, сформулировал закон сохранения вещества и закон сохранения движения. Борясь с теорией теплорода, он пришел к кинетической теории теплоты. Существенный вклад в классификацию химических элементов сделал французский ученый Антуан Лоран Лавуазье. Один из основателей химии, он классифицировал свыше тридцати веществ по аналогиям их химических свойств. Но он не утверждал, что все они простые вещества. Нет, он предвидел в будущем, что «земли» (окислы) перестанут причислять к простым элементам потому, что, как он писал, «они не обладают стремлением к соединению с кислородом, и я склонен думать, что... они уже пересыщены им».

Лавуазье независимо от Ломоносова пришел к закону сохранения вещества и, несомненно, мог пойти много дальше. Но... он занимал должность генерального откупщика, и во время Французской буржуазной революции его гильотинировали как врага и грабителя народа.

Следующий вклад в классификацию химических элементов сделал в 1829 году И. В. Дёберейнер, друг Гёте, фабрикант химических товаров, которого так увлекла тайна, скрытая в изготавливаемых на его предприятиях товарах, что он стал профессором химии. Он разложил своеобразный пасьянс из химических элементов: сгруппировал элементы по три с учетом аналогии химических свойств и расположил их в порядке увеличения атомного веса. И во многих случаях обнаружил поразительную закономерность: атомный вес среднего элемента близок к среднему арифметическому от атомных весов соседей. Такие триады составляют сера, селен, теллур; хлор, бром и йод; кальций, стронций и барий. Конечно же, тут проявилась какая-то закономерность. Эта «игра» в элементы вдохновила многих химиков. Известны и другие попытки подобной классификации.

Решающий шаг в этом увлекательном деле сделал петербургский профессор химии Менделеев. Он не ограничился классификацией элементов. Но попытался вскрыть связь их признаков со свойствами, определяемыми внутренним строением. Ему удалось установить неведомую ранее периодичность изменения физических и химических свойств элементов по мере увеличения их атомного веса. На этой основе он сформулировал закон, позволивший обнаруживать и исправлять ошибки в общепринятых в то время значениях атомных весов некоторых элементов. Опираясь на этот закон, он предсказал существование и даже свойства ряда элементов, в то время еще неизвестных.

К 1869 году Менделеев продвинулся в понимании значения периодического изменения свойств химических элементов так далеко, что решил опубликовать полученные результаты. Название статьи «Соотношение свойств с атомным весом элементов» отражало ее основное содержание. Главный результат работы выражен следующим образом: «Элементы, расположенные по величине их атомного веса, представляют явную периодичность свойств», речь идет о таких химических свойствах, как валентность, и таких физических свойствах, как атомные объемы элементов и удельные веса простых веществ. Под простыми веществами, конечно, понимаются те, что содержат только один элемент. Уже в первом варианте таблицы элементов Менделеев оставил пустые места. Там, по его глубокому убеждению, должны стоять еще не открытые элементы. Он также изменил расположение в таблице кобальта и никеля, теллура и йода, считая, что их атомные веса определены ошибочно, потому что они не соответствуют свойствам этих элементов. Последующие более точные измерения подтвердили правильность его мнения.

Менделеев не ограничился тем, что выявил закон. Он продолжал работать над уточнением периодической системы элементов. Однажды он осознал, что химические свойства элементов повторяются: каждый восьмой и восемнадцатый элемент обладают аналогичными свойствами. Проверив свою догадку, он убедился в том, что существуют два периода (8 и 18) повторения свойств элементов.

В 1871 году Менделеев публикует статью, содержащую уточненную таблицу периодических свойств элементов. Он расположил их в восьми столбцах и одиннадцати строках. Эта таблица давала ключ к пониманию химических свойств известных элементов. Но этим не исчерпывались полученные результаты. В той же статье прозорливый ученый очень подробно описал свойства нескольких неизвестных элементов. Трех из них он дал названия: экабор, экаалюминий и экасилиций. Приставка «эка» указывала на аналогию с элементами, стоящими в таблице сверху. Тогда же Менделеев описал химические свойства неизвестных в то время аналогов марганца, теллура, цезия, бария, тантала. Кроме того, он исправил атомные веса и валентности некоторых элементов, руководствуясь тем, что прежние величины противоречат закону, выраженному его таблицей. Так, он приписал индию валентность 3 вместо принятой прежде 2. Установил, что атомный вес индия вдвое превышает принятый, и потому поместил его в VI группу элементов.

Догадки русского ученого вдохновили химиков-экспериментаторов из разных лабораторий мира на поиск новых веществ. Вскоре, в 1875 году, француз де Буабодран открыл предсказанный Менделеевым экаалюминий и дал ему название галлий. Швед Л. Нилсон в 1879 году выделил скандий, по свойствам совпавший с экабором. А в 1886 году выдающийся химик-аналитик из Саксонии К. Винклер получил германий. Характеристики этого нового элемента с поразительной точностью совпали с характеристиками экасилиция.

Вот как выглядели характеристики предсказанного и открытого элемента. В скобках — числа, предсказанные Менделеевым для экасилиция. Рядом — полученные Винклером для германия. Атомный вес: (72) и 72,60. Валентность: (4 и ниже), 4 и 2. Атомный вес: (13) и 13,5. Удельный вес (5,5) и 5,36. Свойства высшего окисла: молекулярный объем (22) и 22,2; удельный вес (4,7) и 4,703. Свойства высшего хлорида: удельный вес (1,9) и 1,874. Свойства типичного металлоорганического соединения: удельный вес (0,96) и 0,99; температура кипения (160°) и 163,5°. Расхождения не превышали погрешностей измерений. Предвидение Менделеева оказалось точным.

Этот пример показывает, что периодическая система Менделеева действительно отражает глубокий закон природы. И, как надлежит истинному научному закону, позволяет точно предсказывать количественные результаты будущих экспериментальных исследований.

Однако нельзя сказать, что у химиков вовсе не было хлопот с размещением в таблице вновь открываемых веществ.

В 1894 году англичане лорд Роберт Джон Рэлей (сын знаменитого физика Джона Уильяма Рэрея) и Уильям Рамзай обнаружили в воздухе неизвестный ранее странный газ. Он не вступал в химическое соединение ни с одним из известных элементов. Для нового газа, названного вследствие его химической инертности аргон, не оказалось места в периодической системе элементов. Это вызвало волнение среди химиков. К тому времени все признали периодический закон Менделеева и с успехом пользовались его таблицей в работе. И вот странный случай: газ существует, а места ему в таблице элементов нет. Как это понять?

Через год снова возник тот же, вопрос.

В 1895 году Рамзай выделил из урановой смоляной руды неизвестный ранее газ, а спектральный анализ отождествил его с таинственным элементом, обнаруженным еще в 1868 году в спектре Солнца. Замешательство среди химиков еще более усилилось. Следует отметить, что и до Рамзая этот газ обнаруживали в некоторых горных породах, но эти сообщения каждый раз подвергали сомнению. Авторитет Рамзая утвердил существование нового элемента. Его назвали гелием в память о его «солнечном» происхождении.

Рамзай пошел дальше. Вот что мы читаем в его статье: «По образцу нашего учителя Менделеева я описал, поскольку возможно было, ожидаемые свойства и предполагаемые отношения газообразного элемента, который должен был бы заполнить пробел между гелием и аргон». Должен был бы... Но в таблице для него не было места.

Однако газ, обладающий свойствами, предсказанными Рамзаем по рецепту

Менделеева, был в 1898 году выделен им при участии М. В. Трейверса в результате разделения по фракциям большого количества жидкого воздуха. Его свойства соответствовали ожиданиям Рамзая, основанным на периодическом законе Менделеева. Мы знаем этот газ под названием неон. Вскоре ими были тем же методом выделены и другие газы, более тяжелые, чем аргон, — криптон и ксенон. И им не было места в таблице!

Вновь открытые газы походили друг на друга: они были инертными, не способными к участию в известных ученым химических реакциях. Их так и называли — инертными газами. Одно время их называли благородными газами. Это открытие привело к расширению периодической системы Менделеева. В нее по предложению Рамзая ввели нулевую группу. Название продиктовано тем, что инертность вновь открытых газов казалось удобным связать с нулевой валентностью. Нулевую группу поместили перед группой наиболее активных металлов щелочного ряда.

Забегая вперед, сделаем отступление для тех, кто помнит, что в современном варианте таблицы Менделеева нет нулевой группы. Дальнейшие исследования связи химических свойств атомов со строением их электронных оболочек выяснили причину того, почему после первого периода, содержащего только два элемента — водород и гелий, следуют второй и третий периоды, содержащие по восемь элементов, а затем периодичность химических свойств делает скачок: период «восемь» заменяется периодом «восемнадцать».

В результате для сохранения идеи, заложенной Менделеевым в его таблицу, пришлось подразделить каждую из групп (вертикальных столбцов таблицы) на две подгруппы — левую и правую. В левых подгруппах помещены все элементы первых трех периодов и первые десять элементов каждого из больших периодов. Последние восемь элементов больших периодов располагают в правых подгруппах. Некоторую особенность представляет восьмая группа. В ее левой подгруппе расположены тройки: железо, кобальт, никель, а под ними рутений, радий, палладий и осмий, иридий, платина. Правую подгруппу восьмой группы занимают инертные газы.

Возвратимся, однако, к хронологии. В периодической таблице Менделеева еще оставались пустые места, указанные Менделеевым. Путеводной нитью при поиске новых элементов (путем химического выделения из природных соединений) служили их свойства, предсказываемые на основе таблицы Менделеева. Последним элементом, обнаруженным таким путем, был элемент, свойства которого определяются семьдесят пятой клеткой таблицы. Он был назван рением.

Далее поиск еще неизвестных элементов вступил в новую фазу. Химики начали исследовать радиоактивные элементы. В 1939 году француженка М. Пере обнаружила среди продуктов распада радиоактивного элемента актиния новый элемент. Полученный из актиния неведомый продукт «таял» на глазах — каждую 21 минуту от него оставалась половина. Другая часть распадалась с выделением альфа-частиц. И нужно было быть искусным экспериментатором, чтобы успеть определить его характеристики. Свойства незнакомца совпали со свойствами, предсказанными Менделеевым для элемента № 87 — экацезия. Новый радиоактивный элемент был назван францием.

Остальные элементы, предсказанные Менделеевым, впоследствии получены искусственно современными методами ядерных реакций. Этими методами были выделены также многочисленные изотопы — химические аналоги — известных ранее элементов и не встречающиеся в природе элементы с атомным весом, превышающим атомный вес урана. Эта история полна неожиданностей, трудностей, и об этом мы расскажем дальше. Здесь же следует лишь заметить, что Менделеев предчувствовал ход событий и указывал на возможность расширения периодической системы за счет неизвестных еще тяжелых элементов.

Пророческими оказались слова Менделеева: «...периодическому закону будущее не грозит разрушением, а только надстройки и развитие обещает».

Физики отнимают у химиков атом

Дальше происходит то, что иллюстрирует название одной из глав в современной

«Истории химии» итальянца Микеле Джуа «Физика обновляет химию и отнимает у нее атом».

Уже в 1871 году в первом издании фундаментального труда «Основы химии» Менделеев развивает мысль Ломоносова о том, что атомы, со времен древних атомистов считавшиеся неделимыми, «суть сложные вещества, образованные сложением еще меньших частей, что называемое нами неделимым (атомы) — неделимо только обычными химическими силами... Несмотря на шаткость и произвольность такого предположения, к нему невольно склоняется ум при знакомстве с химией».

Там же он обращает внимание читателя на большое значение физических методов исследования и прямо указывает: «Можно надеяться, что он (экаалюминий) будет открыт спектральным исследованием...» И действительно, экаалюминий — галлий — был открыт при помощи спектрального метода — расшифровкой оптических спектров веществ.

Менделеев придавал большое значение сопоставлению закономерностей спектров с периодическим законом: «Во всех подобных сопоставлениях виден зачаток понимания связи между атомными весами, химическими аналогиями и положением спектральных линий простых тел. Но, по моему мнению, еще не видно точных закономерностей, которые управляют зависимостью указанных предметов, а видно только отражение периодического закона».

Менделеев не дожил до того времени, когда связь химических свойств веществ и их физического строения стала фактом науки. Ведь в его время не было известно даже строение атома. Только через четыре года после его смерти физика совершила первый прорыв к пониманию строения материи. Легендарный австралиец Эрнест Резерфорд в 1911 году опубликовал свои опыты по рассеянию альфа-частиц атомами.

Он при помощи своих учеников обстреливал мишень из тонкой металлической фольги узким пучком альфа-частиц и... поразился!

Альфа-частицы рассеивались от мишени не узким пучком, а во все стороны — даже под большими углами. Размышления над этим странным фактом привели его к первым догадкам об устройстве микровселенной атома: такой характер рассеяния частиц-снарядов может быть лишь следствием того, что основная масса атома содержится в малом объеме — ядре. Тут же в ядре атома сосредоточен и его положительный заряд. Резерфорд писал: «Положительный заряд, связанный с атомом, сконцентрирован в крошечном центре, в ядре. А компенсирующий отрицательный заряд распределен в сфере с радиусом, сравнимом с радиусом атома».

Так возникла планетарная модель атома: малое тяжелое положительное ядро, вокруг которого вращаются электроны. Количество электронов таково, что их суммарный заряд компенсирует положительный заряд ядра.

Теперь мы знаем: заряд ядра соответствует номеру элемента в таблице Менделеева. Следовательно, этому же номеру соответствует количество электронов в атоме. Значит, номер, под которым стоит атом в таблице Менделеева, определяет химические свойства этого атома.

Логическая цепочка, которая сегодня всем очевидна. Но путь к пониманию этой взаимосвязи был нелегким. Поначалу модель атома, предложенная Резерфордом, вызвала противоречивую реакцию. С одной стороны, она открывала путь к объяснению физических и химических закономерностей. С другой — явно противоречила теории Максвелла, надежно обоснованной множеством разнообразных экспериментов.

Прежде чем обсудить, в чем заключается это противоречие, следует представить читателю молодого датского физика, который, ответив на этот вопрос, круто изменил плавное развитие классической физики.

Защитив диссертацию в родном Копенгагене, Нильс Бор поехал в Кембридж к Дж. Дж. Томсону, прославившемуся открытием электрона и созданием модели строения атома. Это была дорезерфордовская модель: внутри сферы, равномерно заполненной положительным зарядом, располагались отрицательные электроны. Их суммарный заряд компенсировал

положительный заряд, распределенный внутри сферы. Изучая статьи Томсона, Бор увидел огрехи в его модели. И решил поделиться своими мыслями со знаменитым ученым. Но Томсона не заинтересовали идеи Бора. Тщетно в течение нескольких месяцев Бор ждал возможности обстоятельно поговорить с маститым физиком. Встреча не состоялась. Но пребывание Бора в Кембридже прошло не зря. Там он услышал о Резерфорде и его новой модели атома. Ознакомился и сразу поверил в нее.

Бор поехал в Манчестер, чтобы работать с Резерфордом. Шла весна 1912 года — Резерфорд был в отъезде.

К возвращению Резерфорда Бор четко понял: из модели Резерфорда следует, что не атомный вес управляет таблицей Менделеева, а заряд ядра, обнаруженного Резерфордом в атоме. Истекал срок, отпущенный Бору на поездку в Англию. Но он не мог уехать, не рассказав Резерфорду о своей находке. Чтобы не отнимать у Резерфорда много времени, Бор изложил свои мысли в сочинении, которое, возможно следуя дипломатическому этикету, назвал Памятной запиской.

Резерфорд выслушал Бора без энтузиазма, но все же Дал совет не начинать работу с изучения связи между строением сложных атомов и их химическими свойствами, сосредоточиться на атоме водорода. «это был важный и плодотворный совет.

Обдумывая планетарную модель атома, Бор, естественно, натолкнулся на ее противоречие с теорией Максвелла. Противоречие состояло в том, что электрон, вращающийся по орбите вокруг ядра, должен, в соответствии с теорией Максвелла, излучать электромагнитные волны. При этом энергия его движения превращается в энергию электромагнитных волн. В результате орбита электрона не может оставаться эллиптической. Она превращается в спираль, двигаясь по которой электрон неизбежно упадет на ядро, и атом погибнет.

Все предшественники Бора рассуждали так: теория Максвелла подтверждена многими опытами. Она правильна. Атомы устойчивы. Никто не наблюдал гибели атома. Значит, из противоречия между этой теорией и планетарной моделью следует, что модель Резерфорда ошибочна. Но Бор был в восторге от модели Резерфорда. Только она могла объяснить опыт с рассеянием альфа-частиц. Бор был уверен, что модель соответствует реальности. Где же выход из тупика?

Нужно было обладать гениальной интуицией, спокойной верой в свои силы, чтобы найти выход. И Бор нашел его: модель Резерфорда правильна, теория Максвелла безупречна, но она неприменима к изучению строения атома.

Впоследствии Бор писал: «Я пришел к убеждению, что электронное строение атома Резерфорда управляется квантом действия».

Весной следующего, 1913 года Бор возвратился в Манчестер с готовым ответом: атомы существуют потому, что к ним неприменима теория Максвелла. Это была революция, которую предстояло защищать.

Бор утверждал, что орбиты электронов не произвольны. Электроны вращаются вокруг ядра только по вполне определенным орбитам. Вращаясь по ним, электроны не излучают энергии. Не излучают, вопреки теории Максвелла.

Излучение порции — кванта света происходит только тогда, когда электрон перескакивает с одной из «разрешенных» орбит на другую.

Этого было достаточно для объяснения устройства и устойчивости атома Резерфорда и для объяснения строения оптических спектров атомов.

Таково начало эпохи квантовой физики.

...Когда Бор второй раз приехал в Манчестерский университет к Резерфорду, там уже год работал выпускник Оксфорда Генри Мозли. Он исследовал спектры рентгеновских лучей, испускаемых различными веществами. Получал то, что называют рентгеновскими спектрами. Уже в следующем году он выявил закон, обессмертивший его имя.

Исследуя рентгеновские спектры химических элементов, он обнаружил связь между частотой спектральных линий рентгеновского излучения исследуемого элемента с его

порядковым номером в таблице Менделеева. Этот закон имел большое значение для подтверждения периодического закона химических элементов и установления физического смысла атомного номера элемента.

Свою замечательную работу Мозли выполнил всего за один год. Он не смог пойти дальше — грянула мировая война, он был мобилизован в английскую армию и убит в августе 1915 года в возрасте 27 лет. Но он успел сделать достаточно, чтобы остаться в истории науки.

Бор писал об открытии Мозли: «Этот закон сразу же дал не только убедительное доказательство в пользу атомной модели Резерфорда, но вместе с тем обнаружил потрясающую интуицию Менделеева, который в определенных местах своей таблицы отошел от правильной последовательности возрастания атомных весов».

Резерфорд писал об этой работе: «Открытие Мозли составляет эпоху в истории наших знаний об элементах, оно раз и навсегда закрепляет правильный порядок элементов... от водорода до самого тяжелого элемента — урана».

Работа Мозли имела продолжение, об этом речь впереди.

Колдовство

Идеи Бора воодушевили многих ученых на поиски законов, правящих в микромире атома. Среди них были теоретики американец Чарлз Томсон Рис Вильсон (Нобелевская премия 1927 года за камеру Вильсона для наблюдения космических лучей) и немец Арнольд Иоганн Вильгельм Зоммерфельд, ставший членом многих академий наук.

Их чрезвычайно заинтересовали квантовые числа, предложенные Бором. Казалось бы, Бор использовал формальный прием. Он «перенумеровал» орбиты электронов в атоме, приписав им простые целые числа. Так в науку впервые вошли квантовые числа, характеризующие строение атома.

В действительности этот шаг оказался отнюдь не формальным. В этом убедились прежде всего Вильсон и Зоммерфельд. Они принялись почти одновременно — в 1916 году — на основе модели атома Бора рассчитывать спектры атомов веществ, и прежде всего атома водорода. Поначалу они потерпели фиаско — не получили обещанного Бором оптического спектра водорода. Тем более не удалось рассчитать спектры более сложных атомов. Что же это значило? Неувязка, простая математическая оплошность или трагедия квантовых идей?

Правильно ли они «читают» оптические спектры? Правильно ли учитывают боровские квантовые числа?

Зоммерфельд был одним из тех тонких исследователей, о которых принято говорить, что природа наделила их верной интуицией.

Вначале он был бескомпромиссно предан взглядам Бора, принял их, как видно, полностью, без критики.

Но во всем ли Бор безупречен? Не вкрались ли в постановку задачи ошибки?

Бор считал орбиты электронов в атомах круговыми. Тут он был прямым последователем Коперника, который тоже представлял себе орбиты планет кругами. И ошибался, как мы теперь знаем. Это понял Кеплер. Он смог объяснить тонкие эффекты планетных движений, лишь предположив, что планеты движутся не по окружностям, а по эллипсам.

Обдумывая расхождения между расчетами Бора и спектром водорода, полученным из опыта, Зоммерфельд словно заразился сомнениями Кеплера. И он поначалу исходил из уверенности Бора: орбиты электронов в атоме круговые. Но это привело его к противоречию с опытом. Итак, может быть, они, как и орбиты планет, эллиптические? Может быть, электроны движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых расположено ядро атома? Зоммерфельд, идя по стопам Бора, пошел дальше. Он придал новый смысл квантовому числу. Пусть оно фиксирует не радиус, а среднее расстояние от ядра, вокруг которого электрон движется по эллиптической орбите. Проверка, размышления. Совпадения со

спектральными данными не было! И Зоммерфельд вводит еще одно, новое квантовое число — для обозначения угла, характеризующего направление от ядра к электрону. Снова расхождения. Зоммерфельд был вынужден предположить, что плоскость, в которой лежит оптическая орбита электрона, наклонена к некоторой экваториальной плоскости. Он характеризовал такой наклон еще одним, «экваториальным» квантовым числом.

Вводя свои квантовые числа, Зоммерфельд назвал боровские квантовые числа главными, а свои — одно «азимутальным», а другое, как мы знаем, «экваториальным».

Позже Зоммерфельд напишет: «Это пространственное квантование несомненно относится к поразительным результатам теории. По простоте вывода и результатов оно выглядит почти как колдовство».

О том, как, пользуясь «колдовским» методом, ученые продолжали рассчитывать схемы устройства различных атомов, мы расскажем дальше. А сейчас несколько слов о судьбе работ Генри Мозли.

Возвратимся в 1915 год, год смерти молодого физика. Эстафетную палочку, выпавшую из его рук, поднял Вальтер Коссель, физик-экспериментатор, окончивший Гейдельбергский университет в 1911 году. Главный его интерес был сосредоточен на спектроскопии, теории химических связей и периодической системе химических элементов. Сопоставив рентгеновские спектры атомов с последовательно заполняющимися электронными оболочками атомов, он понял природу химической связи. Это было в 1916 году. Работая в Мюнхенском университете, он поразил научный мир солидной работой — показал, что химические свойства атомов определяются числом электронов во внешней электронной оболочке.

Коссель первым опубликовал вариант периодической системы Менделеева, в которой он, следуя Мозли, пронумеровал все клетки вплоть до урана, пометив прочерками места еще неизвестных в 1916 году элементов.

В том же 1916 году американский физико-химик Гилберт Ньютон Льюис (который в 1929 году введет в науку термин «фотон»), а затем в 1919 году Ирвинг Ленгмюр тоже американский физик и химик (получивший в 1932 году Нобелевскую премию по химии), связали последовательное заполнение электронных оболочек атомов с их химическими свойствами и расположением в клетках таблицы Менделеева. Затем Льюис сделал важный шаг, заметив связь устойчивости молекул с количеством электронов во внешних оболочках атомов, образующих молекулу. Для подавляющего числа устойчивых молекул суммарное количество электронов во внешних оболочках атомов, составляющих эти молекулы, является четным. Если это количество нечетно, то молекула обладает большой химической активностью, она стремится связаться с еще одним атомом или с другой молекулой, чтобы образовать соединение с четным суммарным числом электронов во внешних оболочках соединившихся атомов.

Это был период накопления опытных фактов и феноменологического (описательного) подхода к объяснению свойств атомов и их связи с периодическим законом Менделеева. Итог этому периоду подвел Бор в 1921 году в докладе «Строение атома в связи с химическими и физическими свойствами элементов».

Перечисление всех изложенных в докладе результатов заняло бы слишком много места. Все они направлены на выявление связи строения электронных оболочек атомов с их физическими и химическими свойствами. В частности, Бор подметил, что водород начинается, а гелий завершает первый период таблицы Менделеева. Далее идут периоды от лития до неона и от натрия до аргона, содержащие по 8 элементов, а два дальнейших периода — от калия до криптона и от рутерфордия до ксенона — содержат по 18 элементов.

Исходя из последовательного рассмотрения усложняющихся электронных оболочек и отступления от строго последовательного заполнения их в группах переходных и редкоземельных элементов, Бор объяснил причину химической общности элементов внутри этих групп. Он отметил, что по мере приближения к порядковому номеру 86 снова возникает симметричное образование электронной оболочки, свойственное инертным газам (это место

впоследствии занял неустойчивый радиоактивный газ — радон)

В своем докладе Бор впервые последовательно показал, как в результате увеличения атомного номера (соответствующего величине положительного заряда ядра) происходит заполнение электронных оболочек атома. Как конкретные свойства оболочек, в свою очередь, приводя к периодическому изменению физических и химических свойств веществ. Квантовая теория объяснила то, что почувствовал и понял Менделеев задолго до заступления квантовой эры.

Это было одно из великих достижений первоначальной квантовой теории строения атомов. Оно стало ее последним триумфом. Чтобы после ответа на вопрос, как устроен атом, поставить и ответить на вопрос, почему он устроен именно так, а не иначе, нужен был новый скачок теории превосходящий по своей дерзости и отваге боровскую теорию квантовых атомных орбит.

Из прошлого в будущее

Идеи Бора произвели сильное впечатление на современников. Но никто из них поначалу не обратил внимания № содержащийся в его постулатах намек на трудности философского осмысления атомных процессов. Вспомним, энергия фотона, излученного электроном, определяется двумя состояниями: орбитой, которую он покидает (то есть прошлым), и орбитой, на которую он приходит (то есть будущим).

Так возникает странная ситуация, при которой физический процесс зависит не только от прошлого, но и от будущего!

Это качественно новая проблема, возникшая перед физиками в мире атома, незнакомая им в мире больших вещей. Физики встретились с ней впервые. Она противоречила всему многовековому опыту, положениям классической физики, которая выявила, казалось, неопровержимую истину: каждое явление определяется предшествующим событием. А теперь в микромире выяснилось, что иногда это явление предопределено, зависит от будущего. Создавалось впечатление, что электрон, покидая свою орбиту, знает, куда, на какую из многочисленных доступных ему орбит, он стремится.

Физики этого не знали. Но это надо было научиться предсказывать, если они хотели овладеть тайной атома.

Образовалась еще одна трещина в классической физике. Ученые не могли считать, что фотон рождается после того, как электрон покидает свою первоначальную орбиту — в тот момент, когда он занимает новую орбиту. Потому что он появляется на ней в точном смысле в тот самый момент, как исчезает с первоначальной. Этот процесс не имеет длительности. Что же предопределяет поведение электрона?

Особенно таинственным и необъяснимым казалось то, что расстояние орбит от центра ядра характеризуется определенными числами. Придумав эти числа, назвав их квантовыми, Бор ввел их в расчеты, однако объяснить физический смысл не мог. Но они не были случайностью — тут сказывался жесткий закон. Какой?

Удивительные ответы на эти вопросы дал молодой француз, который начал свою взрослую жизнь со сдачи экзаменов на звание бакалавра по истории, прошел первую мировую войну связистом и заразился физикой от всего старшего брата, рассказавшего ему о волнениях, которые внесли в жизнь ученых кванты. Младший брат, его звали Луи де Бройль, увлекся. Можно сказать, кванты подарили миру великого ученого. Его вклад в науку огромен. Отметим только одну из его работ, имеющую непосредственное отношение к нашей теме.

Размышляя над загадкой электронных орбит, Луи де Бройль представил себе, что электроны в атоме — словно ноты на нотных строчках. Разумеется, это не буквальная аналогия.

Частота звукового тона определяется тем, на какой из строчек нотной записи находится соответствующая нота. Частота электромагнитного поля, которому соответствует

излученный электроном квант энергии, — фотона определяется расстоянием между орбитами: той, с которой электрон исчез, и той, на которой появился. Разность звуковых частот между соседними нотными строчками описывается определенными числами. Подобные числа появляются и при вычислении разности энергии электрона на орбитах в атоме.

Де Бройль представил себе, что электрон, словно некое умозрительное подобие звучащей ноты, связан со своей волной. Что ему уютно только на такой орбите — строчке, где укладывается целое число связанных с ним волн. И если ему суждено перескочить на другую орбиту, он выберет такую, где тоже укладывается целое число волн. У каждого вещества есть свой набор нотных строчек — орбит. Это они определяют, какие именно фотоны способны рождать электроны, перескакивая с орбиты на орбиту в атоме данного элемента.

Так де Бройль связал между собой модель атома, придуманную Бором, с особыми волнами, управляющими поведением электронов в атоме. Расчет, произведенный де Бройлем, привел его к боровским орбитам. Квантовые числа Бора обрели физический смысл.

Внутреннее строение атома все более прояснялось. Оно четко проявлялось и в расположении цветных линии оптического спектра, и в значениях квантовых чисел.

Для того чтобы избежать недоразумений, следует напомнить, что в дальнейшем квантовая физика была вынуждена отказаться от представления движения электронов при помощи определенных орбит. В соответствии с этим изменился и смысл, вкладываемый в квантовые числа, введенные Бором и Зоммерфельдом. Но эти квантовые числа остались необходимыми и в новой квантовой теории, пришедшей на смену квантовой механике Бора — Зоммерфельда.

Метод квантования, который Зоммерфельд назвал колдовством, прочно вошел в обиход физики. Но приемы колдовского ритуала постепенно совершенствовались. Этим колдовством в совершенстве овладел Эдмунд Клифтон Стонер, талантливый физик-теоретик, окончивший Кембриджский университет. Он стал в 1937 году членом Лондонского королевского общества. Круг его научных интересов — проблемы магнетизма, атомной структуры веществ, квантовая статистика. В 1925 году он ввел в науку подразделение электронных оболочек атома на подоболочки. Путь к этому начался так.

Стонер сопоставлял спектральные линии в оптических спектрах атомов со всем набором возможных сочетаний трех квантовых чисел, введенных Бором и Зоммерфельдом перед ним распахнулись двери, ведущие в «кухню» природы, где по вполне определенным рецептам «приготавливались» те или иные атомы.

Стонер сумел проследить, как из спектров атомов с необходимостью вытекает порядок распределения электронов орбитам, начиная от простейшего атома водорода, имеющего один электрон, к сложным многоэлектронным атомам. В 1924 году в статье «Распределение электронов по атомным уровням» он показал соответствие между рентгеновскими спектрами элементов и квантовыми числами Бора и Зоммерфельда.

Стонер пишет: «Электроны могут входить в группу (группами он называл электронные оболочки) до тех пор, пока не будут заняты все возможные (для этой оболочки) орбиты, и тогда атом будет обладать симметричной структурой.

Работа Стонера послужила в определенном смысле завершением работы Менделеева по выявлению связи физических и химических свойств атомов с их взаимным расположением в периодической системе элементов. Запомним: химические свойства элементов определяются количеством электронов во внешней оболочке атома. Внутренние оболочки иногда влияют на химические свойства, но гораздо слабее, чем электроны внешней оболочки.

Теперь в каждой из клеток периодической системы элементов можно было просто нарисовать схему расположения электронных орбит, которые группируются в оболочки, соответствующие периодам таблицы Менделеева. Вопрос о том, как устроены атомы и как их устройство связано с их свойствами, казался выясненным окончательно.

За кулисами периодического закона

Истинным ученым ни один шаг не кажется последним. Прозрачная ясность схемы Стонера неизбежно породила вопрос: почему заполнение электронных оболочек происходит именно так, а не иначе? Что стоит за периодическим законом, на чем основан этот закон?

Уже в марте 1925 года немецкий физик-теоретик Вольфганг Паули ответил на этот вопрос. Ответил введением постулата, ставшего затем одним из фундаментов квантовой физики. Этот постулат известен теперь как «принцип запрета» Паули.

Незадолго до того, анализируя с квантовой точки зрения влияние внешнего магнитного поля на спектр атомов, Паули пришел к любопытному выводу. Он решил, что все известные результаты такого воздействия (открытые голландцем Питером Зееманом, получившим в 1902 году Нобелевскую премию), включая воздействие сильных магнитных полей, можно объяснить. Для этого надо допустить ситуацию, которую нельзя описать классически. Как видно, электрон обладает неизвестной до того своеобразной двужаночностью квантовых свойств.

В статье «О связи заполнения электронных групп в атоме со сложной структурой спектров» Паули опирается на результаты Стонера и на обнаруженную им самим двужаночность квантовых свойств электрона. Для того чтобы упростить рассуждения, Паули отмечает, что при использовании трех квантовых чисел приходится признать, что в атоме, неподвергаемом внешним воздействиям, могут существовать группы орбит электронов, для которых энергии электронов одинаковы. Такие «групповые» состояния он называл вырожденными. Воздействие магнитного поля, в соответствии с наблюдениями Зеемана, выявляет отдельные орбиты, образующие группу. Для того чтобы разобраться в этом, достаточно ввести помимо трех квантовых чисел Зоммерфельда еще одно квантовое число. Если классификация группы производится при помощи четырех квантовых чисел, можно без труда объяснить, как вырожденные группы расщепляются на отдельные орбиты, различающиеся между собой величиной энергии. Причем каждая из таких орбит может быть занята только одним-единственным электроном.

Принцип запрета можно сформулировать так: если в атоме находится электрон, для которого все четыре квантовых числа имеют определенные значения, то это состояние «занято». «Занято» означает, что ни один из других электронов, входящих в состав этого атома, не может иметь такой же набор квантовых чисел.

Паули рассматривает следствия из этого принципа. Принцип запрета не только непосредственно объясняет Зееманом расщепление спектров атомов под действием магнитного поля, но и приводит к результатам Стонера. Более того, так как физические и химические свойства атома определяются его электронными оболочками, то принцип запрета позволил бы построить периодическую систему Менделеева, не опираясь на физико-химические свойства элементов. Не опираясь на то, что послужило Менделееву основой для построения его таблицы.

Система Менделеева, если бы она не была построена самим Менделеевым, возникла бы как необходимое следствие квантовых законов, включая «принцип запрета» Паули. Думая об этом, нельзя не удивляться интуиции Менделеева, позволившей ему сформулировать периодический закон задолго до возникновения квантовой механики.

Постулативный характер «принципа запрета» Паули побуждал ученых к отысканию той физической реальности, которую выявляет этот постулат. В справедливость его поверили все. Без него невозможно объяснить ни тонкие детали атомных спектров, ни физическое содержание периодического закона.

Но что же стоит за этим принципом? В то время (в 1925 году) физики считали окончательно понятым только то, что можно свести к прототипам, изученный в рамках механики Ньютона или электродинамики Максвелла или, наконец, в рамках примирившей их Общей теории относительности. Как же понять физический смысл «принципа запрета»

Паули?

Здесь нужно познакомиться с теоретиком, который отличался разносторонними интересами. Ему принадлежит, кроме физических, ряд исследований по египтологии. Он принимал участие в американской секретной миссии «Алсос», занимавшейся в конце второй мировой войны сбором информации о состоянии атомных исследований в Германии, вывозом документации и оборудования из германских институтов, связанных с атомной проблемой и интернированием немецких физиков-атомщиков. Речь об американце Сэмюэле Абрахаме Гаудсмите.

В 1925 году Гаудсмит вместе с Дж. Уленбеком выдвинул гипотезу о вращающемся электро́не. Эта гипотеза не осталась незамеченной, она вызвала волнение среди физиков. Авторы ее утверждали, что электрон похож на вращающийся, заряженный отрицательным электричеством шарик. Вращается он вокруг одного из своих диаметров. И электрон, как и подобает вращающемуся материальному телу, несущему на себе электрический заряд, обладает собственным механическим и магнитным моментом.

Для обозначения собственного вращения электрона и его механического момента ученые воспользовались четвертым квантовым числом, используя для его обозначения английское слово «спин», которое в переводе означает «волчок». По существу, это было квантовое число, ранее введенное Паули.

Теоретическая часть рассуждений Уленбека и Гаудсмита сводится к следующему: первые три квантовых числа, соответствующие движению электрона по его орбите, отображают три степени свободы, характеризующие положение любого тела в пространстве. Четвертое квантовое число соответствует четвертой — внутренней степени свободы, которой обладает электрон.

В обычной, не квантовой механике тоже известен случай, когда состояние тела не может быть полностью описано тремя числами, описывающими его положение в пространстве. Примером такого тела является вращающийся гироскоп (вариант волчка, применяемый в системах навигации.) Для того чтобы полностью описать состояние гироскопа, нужно иметь сведения не только о его положении, но и о направлении и скорости его вращения, а для этого нужно еще одно число.

Уленбек и Гаудсмит объяснили, что их четвертое квантовое число не связано с движением электрона по орбите, оно характеризует его внутреннее свойство, аналогичное вращательному состоянию гироскопа. Именно поэтому они предложили называть это четвертое квантовое число словом «спин».

Они были не первыми, кто предложил идею вращающегося электрона. Это любопытная история. Впервые вращающийся электрон примыслился американцу Крекингу — стипендиату Колумбийского университета. В январе 1925 года он приехал в Тюбинген, в Германию, тогдашнюю спектроскопическую Мекку. Тут он познакомился с письмом Паули к одному из коллег. Паули сообщал, что, приписав электрону еще одно, четвертое квантовое число, описывающее его поведение в атоме, можно избавиться от всех расхождений между квантовой механикой и спектрами.

Кронинг предположил, что это квантовое число соответствует собственному вращению электрона. Однако его гипотеза была принята с недоверием и Зоммерфельдом и самим Паули. И Кронинг решил не публиковать свои догадки. Он отказался от сомнительной идеи.

И когда Гаудсмит и Уленбек пришли к той же мысли и сообщили о ней, Кронинг реагировал на это довольно своеобразно. «Представляется, что новая гипотеза просто переводит семейное привидение из полуподвала в подвал, вместо того чтобы изгнать его из дома», — проиронизировал он.

Теория спина была признана физиками после работы англичанина Л. Х. Томаса и ленинградского физика Я. И. Френкеля.

Паули, возражавший против идеи вращающегося электрона, теперь сказал: «Хотя я сначала сильно сомневался... вычисления... сделали меня ее сторонником».

Вслед за ним гипотезу спина признали и остальные.

Вот так бывает в науке: в январе 1926 года, разговаривая с Бором, Паули назвал гипотезу спина ересью в марте стал ее приверженцем. Интересно, что в развитии науки физики были вынуждены отказаться от наглядной модели электрона как заряженного вращающегося шарика. Эта модель, облегчившая первоначальное знакомство с квантовыми свойствами электрона, приводила к непреодолимым трудностям. Преодолеть их можно было только отказом от наглядной модели и сохранением спина как внутренней характеристики каждой из микрочастиц.

Принцип Паули и открытие спина в основном завершили выяснение физической основы периодического закона Менделеева.

Но дальнейшее развитие периодической системы — таблицы Менделеева — на этом не прекратилось.

Таблица Менделеева уточнялась в трех направлениях. Во-первых, ученые одно за другим заполняли оставшиеся в ней пустые места, во-вторых, выделяли или синтезировали изотопы, в-третьих, расширяли таблицу за пределы урана.

Пора поразмыслить об изотопах.

Осознание периодического закона и изучение радиоактивности заставило ученых вспомнить об интересной гипотезе, намного опередившей свое время и затем надолго забытой. В 1815 году лондонский врач и химик Уильям Праут выдвинул гипотезу о том, что атомы различных элементов построены из атомов водорода. Он основывался на том, что атомные веса многих элементов являются кратными атомному весу водорода. Если принять атомный вес водорода за единицу, то атомный вес лития близок к 7 бериллия — к 9, углерода — к 12, азота — к 14, кислорода — к 16, фтора — к 19. Отклонение от кратности для Бора и для атомов, более тяжелых, чем фтор, Праут относил за счет недостаточной точности измерения. В первой половине девятнадцатого века многие ученые прибегали к гипотезе Праута, однако последующие значения атомных весов принудили их отказаться от нее. Ведь, например, атомный вес хлора равен 35,453.

Работы Резерфорда привели к планетарной модели атома. Выяснилось, что атомный вес элемента связан с порядковым номером той клетки, которую соответствующий элемент занимает в таблице Менделеева. Все это заставило ученых вспомнить о гипотезе Праута. С другой стороны, исследования радиоактивных элементов, проводившиеся Резерфордом, его сотрудником Ф. Содди и другими физиками, иногда приводили к случаям, когда радиоактивные элементы, получавшиеся в результате радиоактивного распада, обладают необычными свойствами. Заведомо различные элементы, полученные из различных источников и обладающие различной скоростью и даже различным типом дальнейших радиоактивных превращений, оказалось невозможным отделить один от другого никакими химическими методами. Возникла поразительная ситуация: с точки зрения химии эти элементы тождественны, а с точки зрения физики они различны.

Исходя из периодического закона Менделеева, элементы, обладающие тождественными химическими свойствами, следует помещать в одну и ту же клетку периодической системы элементов, несмотря на то что некоторые из их физических свойств оказываются различными. Содди назвал такие элементы изотопами.

Стабильные (нерadioактивные) изотопы неона: неон-20 и неон-22 (здесь и дальше цифры, стоящие за названием химического элемента, указывают его атомный вес), обнаружила в 1913 году Джозеф Томсон (его не следует путать с Вильямом Томсоном, лордом Кельвином, который напугал современников угрозой тепловой смерти Вселенной). Джозеф Томсон прежде всего известен как автор электрона — это он открыл электрон. Он разработал теорию движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, он же создал первую модель строения атома, впоследствии уступившую место планетарной модели Резерфорда. В 1906 году он стал нобелевским лауреатом. Именно его теория движения заряженных частиц в электромагнитных полях и легла в основу масс-спектрографа, важнейшего прибора для измерения атомного веса электронов, сконструированного Френсисом Астоном, который с 1913 года был ассистентом Томсона. Война прервала его

работу. В 1919 году он возвратился и заинтересовался возможностью разделения изотопов. К тому времени никто не сомневался в существовании изотопов, но никому не удавалось выделить их в чистом виде.

Астон теоретически проанализировал возможности основных методов разделения изотопов, через много лет сыгравших свою роль в создании атомной бомбы. Сравнив метод диффузии, возгонки и центрифугирования с методом, примененным Томсоном еще в 1912 году для разделения изотопов неон-20 и неон-22, он убедился, что томсоновский метод наиболее подходящ для лабораторных исследований. (Для промышленного разделения изотопов тяжелых элементов более производительными являются термодиффузия и центрифугирование.)

Метод Томсона состоит в отклонении ионизированных атомов, летящих в вакууме при помощи электрического и магнитного полей.

При проведении первых исследований в 1920 году Астон был поражен тем, что атомные веса всех легких элементов представлялись целыми цифрами. Правило целого числа начинало заметно нарушаться с номера 30.

Было лишь одно маленькое исключение: если принять атомную массу кислорода равной точно 16, то для водорода получалась не единица, а 1,008!

Нужно было обладать незаурядной интуицией, чтобы ставить это различие с предсказанием теории относительности о связи между массой и энергией.

Астон, возродив гипотезу Праута, предположил, что при образовании атомных ядер часть массы протонов переходит в энергию их связи внутри ядра. Он назвал это эффектом упаковки. Теперь это называется дефектом массы.

Получая одновременно с Бором Нобелевскую премию в 1922 году, Астон сказал: «Мы можем быть уверены, совершенно уверены в том, что при превращении водорода в гелий определенная часть массы должна исчезнуть, Космологическое значение этого вывода огромно, и открываемые им возможности для будущего очень важны, важнее, чем любое другое научное открытие, сделанное до сих пор человечеством».

Астон, рассуждая дальше, оценил величину выделяющейся при этом энергии.

Предвосхищая будущее почти на четверть века, он подсчитал, что водород, содержащийся в 9 граммах воды, превращаясь в гелий, высвободит энергию, эквивалентную 200000 киловатт-часов.

«Перед нами источник энергии, достаточный для объяснения происхождения тепла, излучаемого Солнцем», — писал Астон. И далее: «Возможно, будущие исследователи откроют какой-нибудь способ освобождения этой энергии, который позволит ее использовать. Тогда человечество получит в свое распоряжение такие возможности, которые превосходят любую фантазию».

Физики только сейчас приобрели уверенность в том, что «такие возможности» удастся реализовать с пользой для человечества. Для этого необходимо разработать метод и создать аппаратуру, обеспечивающую возможность управления термоядерной реакцией, превращающей водород в гелий. К счастью, не оправдались опасения Астона, сказавшего тогда же: «Но нужно, однако, все время помнить о том, что освобожденная энергия может оказаться совершенно неконтролируемой и благодаря своей огромной силе произвести взрыв всего окружающего вещества».

Последующие расчеты показали, а опыт подтвердил, что взрывы водородных бомб не превратили Землю в новую звезду. Но теперь их запас стал столь большим, что ядерная война неизбежно повлечет за собой гибель человечества вследствие радиоактивности, порождаемой ядерными взрывами.

Нельзя не преклониться перед интуицией, перед истинным провидением человека, предвосхитившего на столь большой срок проблему овладения энергией термоядерного синтеза. Известно, что великий Резерфорд, открывший атомное ядро, вплоть до конца тридцатых годов отвергал возможность практического применения ядерной энергии.

Сейчас известно более 275 стабильных изотопов, принадлежащих 83 природным

элементам и более 2000 радиоактивных изотопов. Среди них изотопы хлор-35 и хлор-37.

После работ Астона физики в течение многих лет считали, что атомные ядра состоят из протонов и электронов. Предполагалось, что количество протонов в ядре атома данного элемента равно его атомному весу, а количество электронов в нем таково, что их отрицательный заряд компенсирует часть суммарного заряда протонов. Точнее говоря, предполагали, что в ядре ровно такое количество электронов, которое требуется для того, чтобы нескомпенсированный положительный заряд ядра оказался равным атомному номеру — номеру той клетки таблицы Менделеева, в которой расположен соответствующий элемент.

Протонно-электронную модель ядра пришлось отвергнуть из-за того, что она ошибочно предсказывала особые свойства ядер, вытекающие из их статистических характеристик.

После того как в 1932 году английский физик Дж. Чедвик открыл новую элементарную частицу (он дал ей название «нейтрон»), не имеющую электрического заряда и обладающую массой, лишь незначительно превышающей массу протона, удалось построить новую модель ядра, удовлетворяющую требованиям статистики. Это сделали советские физики Д. Д. Иваненко и И. Е. Тамм. Они показали, что ядра атомов состоят из протонов и нейтронов. Количество протонов равно атомному номеру (номеру клетки той таблицы Менделеева, в которой расположен соответствующий элемент), а количество нейтронов таково, что сумма числа протонов и числа нейтронов, содержащихся в ядре, равна атомному весу соответствующего элемента. Таким образом, положительный заряд ядра равен количеству содержащихся в нем протонов и этот заряд (равный атомному номеру) определяет химические свойства атомов. Так был сделан еще один шаг к пониманию сущности периодического закона Менделеева.

Постоянство относительного содержания изотопов в элементах, получаемых из различных земных источников, и обнаруженные астрофизиками на небесных объектах отклонения от земной нормы играют большую роль в исследованиях Вселенной. Изотопный анализ, основанный на небольших отклонениях изотопного состава некоторых элементов от обычной нормы, позволяет ученым датировать возраст археологических находок и образцов минералов. Такие отклонения наблюдаются в образцах, в составе которых содержатся наряду со стабильными изотопами и нестабильные изотопы, подверженные радиоактивным превращениям.

Химера ли мечта алхимиков?

Во времена Менделеева люди не знали трансурановых элементов, которые должны располагаться в таблице, носящей его имя, за ураном. Но он предвидел возможность их существования.

Длительный поиск трансурановых элементов в природных рудах, специально обработанных для выделения из них урана, тория, радия и других радиоактивных элементов, не дал положительных результатов. Среди ученых возникло мнение: время жизни трансурановых элементов мало. И если они существовали когда-то, то к нашему времени в результате процессов радиоактивного распада превратились в уран, торий и в более легкие элементы. Лишь много позже, после того как трансурановые элементы были синтезированы в лабораториях и их свойства хорошо изучены, следы некоторых из них удалось обнаружить в природных минералах.

В 1934 году итальянец Энрико Ферми, много работавший с облучением различных элементов нейтронами, предложил синтезировать самый близкий из трансурановых, 93-й элемент. Он собирался осуществить это, облучая ядра атомов урана нейтронами. Такой метод был хорошо освоен при исследовании свойств атомных ядер. Удобство его обусловлено электрической нейтральностью нейтрона. У нейтрона нет заряда, и он без помех может приближаться к ядру, несмотря на его положительный заряд. Даже если нейтрон не попадает точно в ядро, но пролетает достаточно близко к нему, то мощные ядерные силы,

удерживающие внутри ядра образующие его протоны и нейтроны, затягивают нейтрон внутрь ядра. Они изгибают его траекторию даже в том случае, если прицел был неточен, а первоначальная траектория нейтрона была направлена мимо ядра.

Идея Ферми основывалась на том, что уран-238 — долгоживущий изотоп урана. Каждый из его атомов в среднем через 4,5 миллиарда лет испускает альфа-частицу (ядро атома гелия) и перестает быть ураном-238. Ферми знал, что уран-238 не подвержен бета-распаду, сопровождающемуся выделением электрона, а деление ядра и редкий вид радиоактивного распада «К-захват» были в то время еще неизвестны. Метод, предложенный Ферми для синтеза элемента, имеющего заряд ядра больший, чем у ядра урана, основан на том, что при бомбардировке ядер урана нейтронами ядро урана-238, поглотив нейтрон, не изменяет своего заряда. Значит, оно превращается в ядро урана-239 и теряет свою устойчивость по отношению к бета-распаду. Выбрасывая электрон в результате бета-распада, ядро возвращается в область бета-стабильности, но при этом заряд его ядра, а значит, и его порядковый номер увеличивает на единицу. В соответствии с периодическим законом Менделеева элемент, заряд ядра которого увеличился на единицу по сравнению с ядром урана, должен быть расположен в периодической таблице рядом с ураном, правее его. Так, писал Ферми, мог быть синтезирован первый трансурановый элемент.

Однако, следуя предложенному плану, ни Ферми, ни его последователи не достигли цели. Лишь весной 1940 года американцы Э. Мак-Миллан (Нобелевская премия по химии в 1951 году), облучая уран-238 нейтронами, наблюдал образование первого трансуранового элемента. Вновь созданный элемент занял 93-ю клетку таблицы Менделеева. Ему присвоили наименование «нептуний» Это был нептуний-239.

Так началось сенсационное продвижение в трансурановую область таблицы Менделеева.

Здесь уместно сказать, что в 1871 году Менделеев поместил уран в VI столбец, который он начал кислородом. Непосредственно над ураном Менделеев расположил вольфрам. Радикальное изменение таблицы произвел в 1902 году профессор химии в Праге Богуслав Браунер. Он провел тщательное определение атомных весов теллура и церия, ввел нулевую группу, ввел в таблицу все открытые к тому времени элементы и расположил редкоземельные элементы в одной общей для них клетке IV столбца, рядом с клеткой, занятой лантаном. При этом он расположил уран в V столбце, под висмутом. Но это был не окончательный вариант. Последующие успехи химиков привели к дальнейшей корректировке периодической системы.

В таблице 1961 года значительно увеличившаяся группа редкоземельных элементов была перемещена в III столбец таблицы, в ее 57-ю клетку, где теперь, помимо лантана, располагаются все 14 редкоземельных элементов. Последний из них — лютеций — имеет атомный номер 71. Одновременно уран возвратился на место, указанное ему Менделеевым, и получил присущий ему номер 92. Здесь вместе с ним были помещены синтезированные к тому времени нептуний (номер 93), плутоний (номер 94) и америций (номер 95). О двух последних мы еще вспомним. Та четверка была объединена в семейство под названием «ураниды». В 89-ю клетку таблицы, под 57-й клеткой, где расположилась группа лантанидов, вместе с актинием бы-1 помещены трансурановые элементы, более тяжелые, чем америций. Это новое семейство получило название «кюриды» в честь Поля и Марии Кюри.

Модернизация не завершила эволюцию таблицы Менделеева. Более того, последовательное применение открытого им периодического закона заставило физиков соединить воедино семейства уранидов и кюридов и поместить их всех в 89-ю клетку таблицы вместе с актинием. В соответствии с названием первого члена семейства его теперь называют семейством актинидов. Оно располагается в группе таблицы, а уран, сохранив за собой номер 92, стал рядовым членом семейства актинидов, отличаясь от остальных огромным временем полураспада. Мы знаем, что половина его атомов, содержащихся в каком-либо образце, распадается только за 4,5 миллиарда лет.

Продвинуться дальше в трансурановую область тем же методом, то есть облучением

тяжелых ядер нейтронами, не удалось. Слишком малы были потоки нейтронов, доступные исследователям в 1940 году. Это заставило физиков избрать другой путь, кажущийся с первого взгляда более трудным. Они решили возвратиться к первоначальному методу Резерфорда, облучавшего ядра-мишени альфа-частицами. Резерфорд успешно облучал альфа-частицами легкие ядра, имеющие сравнительно небольшой положительный заряд, не способный воспрепятствовать положительной альфа-частице приблизиться к ядру и проникнуть в него. Физики знали, что тяжелые ядра, обладающие большим положительным зарядом, не позволят приблизиться к себе альфа-частицам, вылетающим из ядер радиоактивных элементов, которыми пользовался Резерфорд и все его последователи. Но к 1930 году Эрнест Лоуренс, замечательный физик-инженер, с первым своим помощником Эдлефсеном изобрел и построил в Калифорнийском университете циклический ускоритель заряженных частиц — циклотрон. Эта машина способна разгонять заряженные частицы — протоны, дейтоны и альфа-частицы — до энергий 20–40 Мэв*.

При столь высоких энергиях такая частица способна преодолеть отталкивающие силы заряженного ядра урана и приблизиться к нему столь близко, что мощные ядерные силы втянут ее внутрь ядра.

Если энергия ускоренной частицы превышает кулоновский барьер ядра*, то этот избыток энергии входит вместе с частицей внутрь ядра и нагревает его, как нагревает мишень застрявшая в ней пуля: кинетическая энергия движения превращается в тепло. В данном случае в тепловые движения протонов и нейтронов внутри ядра-мишени.

Нагретое ядро остывает, выбрасывая один или несколько нейтронов. В результате образуется новое ядро. Если для бомбардировки применялись ускоренные дейтоны (заряд + 1), то остывшее ядро, потеряв нейтрон, сохраняет заряд на единицу больший, чем заряд ядер мишени. Так, в декабре 1940 года при бомбардировке урана дейтонами был повторно синтезирован нептуний-239 и другой изотоп, нептуний-238.

Этот изотоп подвержен бета-распаду. В результате ядро нептуния-238, практически не изменяя своей массы (масса улетевшего электрона почти в 2000 раз меньше массы протона и нейтрона), но увеличивая свой заряд на +1, превращается в новый элемент, идентифицированный 23 февраля 1941 года и названный плутонием (это плутоний-238). Он должен быть расположен в таблице Менделеева правее нептуния. Так был получен второй транс-урановый элемент, плутоний-238.

Вскоре группа в составе Эмилио Сегре, Джозефа Кеннеди, Артура Вэйля и Глена Сиборга, исследовавшая радиоактивный распад нептуния-239, обнаружила изотоп плутоний-239, его важнейший изотоп, способный к делению, аналогичному делению изотопа уран-235. Уже к 1942 году удалось изготовить 0,5 мг плутония — количество, достаточное для изучения его химических свойств. В 1944 году этот метод снова привел к успеху. Сиборг — незаурядный ученый, ставший нобелевским лауреатом, бывший некоторое время председателем атомной комиссии при конгрессе США, — и его сотрудники осуществили бомбардировку альфа-частицами ядер плутония-239. При поглощении альфа-частицы масса ядра возрастает на четыре единицы, а заряд на две. Возникшее при этом ядро остывает, испуская нейтрон. При этом масса ядра уменьшается на единицу, а его заряд остается неизменным. Так был синтезирован четвертый трансурановый элемент, который получил название «кюрий» (номер 96). Так был получен изотоп кюрий-242.

Все трансурановые элементы радиоактивны, но имеют самые разнообразные времена жизни: нептуний — около 2 суток, плутоний — 24 000 лет, америций — 500 лет, кюрий — 5 месяцев.

После пуска ядерных реакторов открылся новый путь синтеза трансурановых элементов.

Деление ядра — новый вид радиоактивных превращений, ставшее надеждой и угрозой жизни людей XX века, — было открыто в 1939 году немецкими физиками Отто Ханом и Фрицем Штрассманом при бомбардировке ядер урана нейтронами. Они обнаружили, что при такой бомбардировке возникают ядра щелочно-земельных элементов (II группа таблицы

Менделеева). Вскоре Лиза Мейтнер (талантливая женщина-физик, работавшая в Институте кайзера Вильгельма в Берлине, которая одна из первых поняла возможность военного применения реакции деления, бежала накануне второй мировой войны в Голландию, а затем в Копенгаген к Бору) и ее племянник О. Фриш объяснили: при этом делятся ядра изотопа уран-235. Поглотив лишний нейтрон, они становятся неустойчивыми и распадаются примерно на две равные части. В 1940 году советские физики Г. Н. Флеров и К. А. Петржак сделали важнейшее открытие — обнаружили спонтанное (самопроизвольное) деление ядра. Начался новый этап продвижения в трансурановую кладовую природы.

Капли и реакторы

Факт деления ядер урана заставил физиков глубже изучить внутреннее строение атомных ядер. Простого представления о том, что в ядре тесно связаны протоны и нейтроны, удерживаемые мощными ядерными силами, было недостаточно для того, чтобы рассчитать детали процесса деления.

Теорию деления ядер создали Бор и Дж. А. Уилер и независимо от них Я. И. Френкель. Они рассматривали ядро упрощенно, уподобив его капле несжимаемой жидкости. Электрический заряд протонов ядра стремится разрушить его. Ядерные силы удерживают частицы, входящие в ядро, аналогично тому, как молекулярные силы удерживают молекулы жидкости, образующие каплю. Это отнюдь не формальная аналогия. Молекулы жидкости, расположенные на поверхности капли, постоянно испытывают совокупную силу притяжения остальных молекул, направленную к центру капли. Но жидкость несжимаема, молекулы, находящиеся глубже, не дают внешним молекулам сдвинуться внутрь. Стремление внешних молекул следовать силе, тянущей их внутрь, уравнивается внутренним давлением. Ситуация похожа на ту, что возникает в надутом резиновом шарике. Давление воздуха не дает резиновой оболочке сжаться. Оболочка остается напряженной действующими в ней молекулярными силами.

Это, конечно, лишь аналогия. В ядре, как и в капле жидкости, нет оболочки, состоящей из инородного вещества. Но в его поверхностном слое преобладают мощные ядерные силы, удерживающие все протоны и нейтроны внутри ядра. Это равновесное состояние может нарушиться при попадании в ядро лишнего нейтрона или протона. Капля «ядерной жидкости» начнет колебаться. Она может отдать избыток энергии, например выбросив из себя нейтрон. Невозможен и другой процесс. Колебания поверхности ядра могут оказаться столь интенсивными, что ядро примет форму гантели — двух шаров, соединенных перемычкой. Если колебания очень велики, перемычка может разорваться. Произойдет деление ядра на две части, которые под влиянием ядерных сил стремятся стянуться в две отдельные капли — в два ядра.

Обратим внимание на важное обстоятельство. Масса этих ядер не обязательно одинакова. Не одинаково может быть и распределение между ними полного количества протонов и нейтронов, входящих в исходное ядро. В соответствии с количеством протонов в каждой из частей между ними перераспределяются электроны, окружавшие исходное ядро. Возникают два, тоже не обязательно одинаковых, атома.

Ядра этих атомов обычно сохраняют избыточную энергию. Они освобождаются от нее — «остывают», например испуская по одному нейтрону. Иногда может выделяться и больше одного нейтрона.

Когда ученые осознали механизм деления ядра, некоторые из них увидели путь овладения ядерной энергией.

Возможность спонтанного деления, без участия внешних нейтронов, открывала и путь к созданию атомной бомбы. Ее следовало бы назвать ядерной бомбой, ведь при ядерной реакции выделяется энергия, заключенная в ядре — ядерная энергия. Это не энергия электронных оболочек, отдаваемая при химических реакциях, например при горении или обычном взрыве. Однако название «атомная бомба» стало привычным и

общеупотребительным.

Первые оценки количества урана, способного самопроизвольно положить начало реакции деления его ядер, сделали Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон, два выдающихся советских физика. Они подсчитали: вероятность спонтанного деления ядер урана-235 очень мала. Но при каждом акте деления высвобождается (в среднем) более двух нейтронов. Попав в ядро соседнего атома урана-235, каждый из них практически мгновенно вызовет деление этого ядра и высвободит еще два или больше нейтронов. Так развивается цепная ядерная реакция, ядерный взрыв. Зельдович и Харитон правильно оценили, какой должна быть масса урана-235 для «запуска» цепной реакции, для взрыва бомбы.

В ядерных реакторах, применяемых для получения ядерной энергии в мирных целях, принимаются меры к тому, чтобы не дать цепной реакции деления ядер перейти во взрыв. Для этого специальная система управления поглощает часть нейтронов. Достигнув определенной величины, скорость ядерных реакций более не возрастает.

Внутри реактора бушует первозданная стихия: рождается огромное количество нейтронов и тут же поглощается соседними ядрами и системой управления. Когда ученые достаточно глубоко осмыслили характер этих процессов, они поняли: это подходящий котел для «варки» трансурановых элементов! При этих условиях может успешно реализовываться предложенный Ферми метод получения тяжелых элементов. Первый шаг здесь — выделение и накопление изотопа плутоний-239. Второй — использование этого изотопа для накопления более тяжелых трансурановых элементов.

Эксперимент был осуществлен. Он происходит следующим образом. Внутри ядерного реактора, туда, где через каждый квадратный сантиметр любой поверхности пролетает миллион миллиардов нейтронов, помещают образец плутония-239. Каждое ядро плутония-239, поглотив один нейтрон, превращается в ядро плутония-240. Оно может избавиться от полученной при этом избыточной энергии двумя путями. 70 % ядер испытывают процесс деления, порождающий два ядра. Эти ядра образуют в свою очередь два атома, принадлежащие к средней области таблицы Менделеева. 30 % ядер плутония-240, не успевая претерпеть деление, поглощают еще один нейтрон, превращаясь в ядро плутония-241. Дальше процесс опять может развиваться двумя путями: 20 % от первоначального количества ядер плутония-241 испытывают деление, а 10 % поглощают еще один нейтрон, превращаясь в плутоний-242. Вероятность деления этих ядер очень мала. Все они поглощают еще один нейтрон, превращаясь в плутоний-243. Это ядро испускает электрон. Ученые говорят, ядро неустойчиво относительно бета-распада. И, увеличив при этом свой заряд на единицу, переходит направо, в соседнюю клетку периодической системы. В данном случае оно располагается на пустом месте между плутонием и кюрием. Новое ядро, окружив себя электронами, становится атомом, получившим название «америций». Это изотоп америций-243.

Мы должны остановиться, для того чтобы ответить на вопрос внимательного читателя: каким образом ядро, состоящее из протонов и нейтронов, может испустить электрон?

Это законный вопрос. Он не может остаться без ответа. Действительно, мы уже знаем, что внутри атомных ядер не существует свободных электронов.

Ответ таков: нейтрон не является стабильной частицей. В свободном состоянии он, под влиянием внутренних процессов, распадается, порождая протон, электрон и антинейтрино. Слово «порождает» имеет здесь точный смысл. Нейтрон не содержит в себе этих трех частиц. Они возникают при его распаде примерно через 15 минут после того, как нейтрон становится свободным от внешних воздействий.

Внутри большинства ядер нейтрон приобретает стабильность. В них он может существовать вечно. Но в некоторых ядрах нейтрон получает возможность распасться. При этом внутри ядра остается новорожденный протон, а наружу вылетают электрон и антинейтрино. Это и есть процесс бета-распада ядра. В результате масса ядра почти не изменяется (масса улетевших частиц очень мала), а заряд ядра увеличивается на единицу. Значит, оно, пополнив свою электронную оболочку одним электроном, переносится в

таблице Менделеева на одну клетку вправо.

Возвратимся теперь к ядру америция-243.

Рассматриваемый нами процесс не заканчивается на образовании америция-243. Поглотив один нейтрон, америций-243 превращается в кюрий-244, изотоп ранее синтезированного кюрия-242. Для кюрия-244 главным способом распада оказывается деление. 8,5 % от первоначальных ядер испытывают деление, а 1,5 % успевают поглотить два нейтрона, превращаясь в изотоп кюрий-246. И снова две возможности: 0,8 % от первоначальных ядер, ставшие изотопом кюрий-246, испытывают деление, а 0,7 % из них поглощают по два нейтрона, превращаясь в кюрий-248. Теперь ядро кюрия-248 поглощает лишь один нейтрон, образуется кюрий-249. Но прежде чем оно успевает поглотить второй нейтрон, происходит бета-распад — испускание электрона. Тем самым ядро приобретает добавочный положительный заряд и превращается в ядро следующего, пятого трансуранового элемента, названного берклием. Так рождается изотоп берклий-249.

Увлекательная «игра» в сотворение новых, невиданных элементов привлекла многих физиков. Но для того чтобы продвинуться таким путем дальше, потребовалось увеличить плотность потока нейтронов, воздействующего на образец, еще в десять миллионов раз! Мера, необходимая потому, что ядра тяжелых трансурановых элементов, следующих за берклием, при меньших плотностях потоков нейтронов разрушаются раньше, чем успевают поглотить еще один нейтрон.

При увеличении плотности потока нейтронов ядра берклия-249 успевают поглотить по одному нейтрону и, «перепев» бета-распадом, потеряв электрон, превращаются в ядра нового трансуранового элемента, получившего наименование «калифорний». При этом получается калифорний-250. Его ядра испытывают процесс спонтанного деления. Те ядра калифорния-250, которые, не успев претерпеть деление, поглощают два нейтрона, превращаются в изотоп калифорний-252. Их оказывается всего 0,3 % от исходного количества плутония-239, если он облучался потоком нейтронов плотностью в 10 нейтронов через квадратный сантиметр в секунду.

Этим методом удалось получить 99-й трансурановый элемент эйнштейний и 100-й трансурановый элемент фермий-258. Дальше продвинуться не удалось — изотоп фермия делился спонтанно чрезвычайно быстро.

Еще большие плотности потоков нейтронов возникают при термоядерных взрывах. В 1953 году в США при термоядерном взрыве был пройден своеобразный рубеж — создан элемент фермий, который образовался из ядер урана-238. Некоторые из таких ядер поглотили одновременно по 17 нейтронов! При этом образовались неустойчивые ядра урана-255, которые испытали цепочку из последовательных семнадцати бета-распадов, что и привело к образованию изотопа фермий-255.

Ученые продолжили исследования с применением термоядерных взрывов. Они смогли увеличить плотность потока нейтронов еще в сто раз. Однако новых трансурановых элементов получить не удалось. Наградой за усилия был лишь еще один изотоп сотого элемента — фермий-257, образовавшийся из ядер урана-238 при одновременном поглощении ими по 19 нейтронов.

Причиной, ограничившей возможности дальнейшего продвижения методом термоядерных взрывов, является малое время жизни тяжелых изотопов в области урана — фермия. Эти изотопы разрушаются вследствие спонтанного деления, прежде чем успевают подвергнуться бета-распаду. Возможности этого метода ограничиваются и другой причиной. Вероятность поглощения ядром урана одновременно многих нейтронов резко уменьшается и становится ничтожной для числа, превышающего 19.

Путь вверх — от 100-го элемента к 101-му — потребовал усовершенствования метода облучения тяжелых ядер ускоренными заряженными частицами. Оказалась необходимой и разработка более совершенных методов опознания — идентификации новых элементов.

И все-таки в 1955 году был получен 101-й элемент. Его назвали менделевием. Многозначительная деталь: он был получен в США, но назван в честь русского химика

Менделеева.

О том, сколь быстро возрастают трудности получения и опознания элементов за порогом 100-го элемента, можно судить по следующим примерам. При синтезе калифорния в 1950 году в распоряжении исследователей было 0,5 миллиардной части от миллиардной доли грамма эйнштейния-253. Столь маленькое количество ядер-мишеней привело к тому, что при облучении альфа-частицами в течение часа образовывался лишь один атом менделевия-256! Сначала получались возбужденные ядра менделевия-257, потом они «остывали», выделялся нейтрон, что приводило к менделевию-256.

Таким путем — в течение длительного облучения — было синтезировано всего 17 атомов нового элемента. Но Ученые все же смогли надежно определить, что они действительно принадлежали 101-му элементу.

Существенным достижением, полученным путем бомбардировки мишени ускоренными альфа-частицами, стал синтез наиболее долгоживущего, тяжелого изотопа менделевия-258. Время его жизни, определяемое временем, в течение которого распадается половина из наличных Томов, равняется двум месяцам. В этих опытах мишенью были ядра эйнштейния-255. После поглощения альфа-альфа-частицы возникало ядро менделевия-259, которое, остывая, выделяло один нейтрон и превращалось в ядро менделевия-258.

Начиная со 102-го элемента трудности накопления и тем более идентификации усугубились малым временем жизни новых атомов. Обычные химические методы опознания оказались при этом непригодными. Они занимали слишком много времени.

Адам, Ева и Царь-пушка

Наступил 1956 год. Ученые Объединенного института ядерных исследований в подмосковном городе Дубне, входившие в группу физиков из ряда социалистических стран, руководимую академиком Флеровым, проанализировали ситуацию и нашли новый путь синтеза трансурановых элементов.

Теперь, когда этот путь неоднократно пройден и доказал свою эффективность, идея, положенная в его основу, кажется простой и очевидной. Вот ход мыслей исследователей: прежний путь — бомбардировка мишеней нейтронами, ускоренными дейтонами и альфа-частицами — зашел в тупик, он пройден до конца. Так уже невозможно создать более тяжелые долгоживущие мишени. Не следует ли использовать доступные мишени и применить для бомбардировки мишени ядра более тяжелые, чем альфа-частицы?

Конечно, ускорение тяжелых ядер связано с большими трудностями. Для этого необходимо прежде всего создать источники ионов соответствующих элементов, устройства их ввода в ускоритель и средства управления процессом ускорения.

Первые опыты предусматривали бомбардировку мишеней, содержащих изотопы плутония и кюрия. Снарядами служили ускоренные ионы кислорода и углерода. Метод оказался весьма эффективным. Он был воспринят и в других институтах.

Основные работы по синтезу трансурановых элементов при помощи бомбардировки мишеней тяжелыми ионами проводились в лаборатории ядерных реакций в Дубне и в Радиационной лаборатории имени Лоуренса в Беркли (США). В Дубне для этого применяют большой циклотрон, Царь-пушку. В Беркли для экспериментов служат два линейных ускорителя ионов. Физики называли их Адам и Ева.

В качестве снарядов обычно применяют ионы бора, углерода, азота, кислорода, фтора, неона, серы, аргона и кальция. Полезным результатом попадания ускоренного ядра в ядро мишени является их слияние. Наряду с этим происходят и другие ядерные реакции, приводящие к синтезу новых ядер, но они труднее поддаются анализу, что осложняет получение уверенных результатов этих реакций.

При проведении бомбардировки тяжелыми ионами необходимо придать им значительную энергию. Она должна быть достаточна для преодоления электростатического барьера, препятствующего проникновению положительно заряженного ядра-снаряда в

положительно заряженное ядро-мишень. Высота этого барьера увеличивается вместе с увеличением зарядов ядер-мишеней и ядер-снарядов. Для того чтобы вероятность слияния этих ядер воедино была достаточно велика, необходимо, чтобы энергия ядра-снаряда значительно превосходила электрический барьер. Но при этом ядро-снаряд, проникнув в ядро-мишень, вносит с собой большую избыточную энергию. Поэтому слившееся ядро оказывается сильно возбужденным.

Основным процессом «охлаждения» — снятия возбуждения составного ядра — является процесс деления. Доля составных ядер, остывающих путем испарения нейтронов, оказывается очень малой. Для изотопов 102-го элемента эта доля составляет от миллионной до стомиллионной от общего количества ядер мишени, слившихся с ускоренными ядрами. Остальные испытывают процесс деления, не приводящий к образованию трансурановых элементов, ибо осколки имеют массы, средние между массой ядра-мишени и массой поглощенного ядра-снаряда. Для изотопов 103-го элемента доля ядер, не успевших претерпеть деление, в десять раз меньше, а для изотопов 104-го элемента она близка к десятимиллиардной доле по отношению к процессам, происходящим при образовании 101-го элемента. На лучших из существующих ускорителей рождается за час лишь несколько десятков атомов 102-го элемента и только один атом 103-го элемента за несколько часов.

Первое сообщение о синтезе элемента-102 было сделано в 1957 году международной группой американских, английских и шведских ученых, работавших совместно в Нобелевском институте в Стокгольме. Вторая работа была проведена в 1958 году в Радиационной лаборатории им. Лоуренса в Беркли. Результаты этой работы подтвердили, что 102-й действительно синтезирован.

Однако, когда в Беркли в том же 1958 году был пущен новый линейный ускоритель тяжелых ионов, позволивший получить значительно больше материала для идентификации вновь рожденных элементов, оказалось, что предыдущие результаты ошибочны!

В среде ученых возникла дискуссия, многие ее участники произвели переоценку результатов и пришли к заключению, что элемент-102 в этих экспериментах не был синтезирован.

Однако попытки синтеза элемента-102 в Беркли продолжались с применением других методов идентификации. В это время в исследования включился Институт атомной энергии в Москве. И та и другая группа время от времени сообщали о синтезе и идентификации различных изотопов элемента-102, однако количество синтезированных атомов составляло лишь несколько десятков, а методы опознания не обладали достаточной точностью.

Окончательное решение проблемы элемента-102 было дано в 1964 году в Дубне. При этом применялось несколько взаимно контролировавшихся методов и различные варианты аппаратуры.

В результате были надежно зафиксированы и изучены изотопы элемента-102 с различными массовыми числами от 252 до 256 и показано, что в ранних работах допущены существенные ошибки. После этого в Беркли были синтезированы изотопы элемента-102 с массовыми числами 251 и 257 и подтверждены дубненские данные об остальных изотопах.

Так, в 1966 году была завершена десятилетняя работа, позволившая ученым получить и надежно изучить свойства элемента-102.

Еще большие трудности возникли на пути к элементу-103. В Беркли эти работы велись с 1958 года по 1961 год, причем сообщалось о синтезе изотопов с массовыми числами 257, 259 и 260. Но эти эксперименты не удалось повторить. В позднейших публикациях авторы сообщали о пересмотре толкований ранних экспериментов, однако попытки воспроизвести их в 1965 году в Дубне не дали положительного результата.

Наконец, результаты, полученные в 1965 году в Дубне по изотопу элемента-103 с массовым числом 256, были подтверждены в Беркли. Так мир услышал о новом трансурановом элементе, названном «резерфордий».

Несмотря на очевидное усложнение задачи синтеза и опознания трансурановых элементов при увеличении их атомного номера работы не прекращались. В 1964–1967 годах

в Дубне велись интенсивные работы с целью получения следующего элемента, теперь уже 104-го. Синтез осуществлялся бомбардировкой ионами неона-22 мишени, содержавшей атомы плутония-242. Анализ результатов проводился несколькими физическими и химическими методами и увенчался успехом. Исследователи предложили назвать новый трансурановый элемент-104 курчатовием (химический символ *Ku*) в честь академика И. В. Курчатова.

В 1970 году Дубна подарила миру еще один новый элемент, 105-й, — нильсборий.

Возникает законный вопрос: где природа положила предел синтезу еще более тяжелых трансурановых элементов?

Ответ на этот вопрос еще не известен. Окончательное решение может вынести только опыт. Ясно, что подобные опыты сопряжены с величайшими трудностями. Однако теория может и должна указать экспериментаторам наиболее простые пути. Должна и может с достаточно хорошей достоверностью оценить возможности проведения таких опытов. Об этом мы еще будем говорить чуть дальше.

Прежде чем продолжить путь в трансурановые заповедники природы, следует ответить на другой вопрос: зачем это нужно? Зачем тратить силы и средства на подобные работы?

Уйти от этого вопроса невозможно. Он возникал и возникает вновь. Существует несколько ответов на него.

Первый: это нужно для удовлетворения естественного стремления человека к познанию окружающего мира. Люди будут бороться за знания, жертвуя для этого многим. На основе многовекового опыта мы знаем, что борьба за понимание явлений природы обычно порождает неожиданные открытия, имеющие не только научное, но и практическое значение. Поиск трансурановых элементов не является исключением.

Второй ответ звучит более конкретно. Плутоний является важным источником ядерной энергии. Изотоп уран-235 составляет лишь одну стотую часть природного урана. Непосредственное применение урана-238, составляющего остальные сто тридцать девять стотых (139/140), проще всего осуществить, предварительно превратив его в плутоний-239. Так и делают в специальных ядерных реакторах. Результат: в сто раз увеличиваются энергетические ресурсы урановых руд. Это, вероятно, сделает рентабельной добычу урана из рассеянных бедных руд, возможно даже из гранита.

Изотопы плутоний-238, кюрий-242 и кюрий-244 служат компактными источниками тепловой энергии, принадлежащими к совершенно новому типу. Эти изотопы испускают только альфа-частицы с большой кинетической энергией, которая переходит в тепло при их поглощении в окружающей среде. Для практического использования важно, что они не испускают опасных для человека гамма-лучей или нейтронов. Существенно, что альфа-частицы поглощаются полностью в тонких слоях вещества, поэтому альфа-радиоактивность безопасна для человека. Выделяющееся при этом тепло можно очень просто и с большим КПД превратить в электрическую энергию при помощи термоэлементов. Такие малогабаритные, легкие источники, способные работать много лет, уже применяются в регуляторах сердечного ритма (кардиостимуляторах), вживляемых в организм больного. Приборы большого размера обеспечивают работу аппаратуры искусственных спутников Земли, автономных метеорологических станций, автономных навигационных буев и т. п.

Возвратимся к первоначальному вопросу: есть ли предел расширения периодической таблицы Менделеева?

Исследование свойств атомных ядер ведет нас к все более глубокому пониманию структуры системы Менделеева и законов симметрии, скрытых в недрах материи.

Хидэки Юкава, японский физик-теоретик, который первым понял секрет строения атомного ядра, объяснил, почему положительный заряд протонов, входящих в ядро,

не разрушает его, — этому препятствуют особые ядерные силы. Эти силы, действующие между протонами и нейтронами в недрах ядра, на малых расстояниях превосходят силы электростатического отталкивания между ними. При дальнейшем уменьшении расстояния они превращаются в силы отталкивания, и это не позволяет

протонам и нейтронам слиться в бесконечно малую точку. Ядерные силы одинаково воздействуют и на протоны и на нейтроны. Они таковы, что протоны и нейтроны, находясь внутри ядра, оказываются неразличимыми между собой. Все они становятся одинаковыми частицами — нуклонами, ядерными частицами. А положительный заряд, свойственный свободным протонам, находящимся вне ядра, покидает их внутри ядра и оттесняется к его поверхности.

Ядро ведет себя как капля особой ядерной жидкости, стянутой ядерными силами, подобно тому как капли обычных жидкостей стянуты силами поверхностного натяжения. Так представили модель ядра Бор и Уилер. Ее назвали капельной моделью. Это представление способно объяснить многие свойства ядер и позволяет произвести расчет их основных свойств. В том числе многих важных процессов, таких, как деление ядер. Но известен и ряд фактов, не поддающихся объяснению на основе капельной модели.

В частности, она не позволяет понять, почему по мере увеличения заряда ядра и его массы устойчивость ядер не меняется равномерно и монотонно, а испытывает странные изменения.

Это заставило ученых признать, что капельная модель ядра нуждается в уточнении. Перемежающиеся увеличения и уменьшения устойчивости ядер атомов как бы намекают на существование еще не понятой закономерности, периодичности, подобной той, которую Менделеев выявил для химических свойств атомов.

Магические числа

Теперь мы знаем, что химическая активность и химическая инертность элементов сменяют одна другую по мере продвижения по периодической таблице в результате изменения строения электронных оболочек атомов. Атомы, имеющие заполненные внешние электронные оболочки, особенно инертны. Это инертные газы. Атомы, во внешней оболочке которых лишь один электрон, и те, в которых до заполнения внешней оболочки не хватает одного электрона, особенно активны. Таковы водород и щелочные металлы с одной стороны, и галогены — фтор, хлор, и им подобные, — с другой.

Вероятно, эта аналогия стимулировала И. Иенсена и М. Майера к разработке менее противоречивой модели ядра — она теперь известна как оболочечная модель. Физическая ее интерпретация не объясняет, почему возникают те или иные явления в атоме, но модель описывает их, позволяя таким образом представить себе основные черты явления и даже предсказывать новые события. Обычно для этого физическая модель, плод аналогий и интуиции, должна быть дополнена математической моделью. Если вычисления, проведенные на основе математической модели, позволяют получать результаты, близкие к данным, известным из предыдущих экспериментов, Ученые считают, что модель отображает моделируемый объект. Если же модель позволяет предсказывать новое, 1 затем опыт подтверждает, что предсказание близко к реальности, то ученые склонны считать эту модель — теорией изучаемого явления.

Существо оболочечной модели сводится к следующему: она предполагает, что ядерные частицы — нуклоны — группируются внутри ядерного вещества в некие коллективные образования. По аналогии с электронными оболочками атома такие коллективы получили наименование оболочек.

Ученые понимали, что это лишь отдаленная аналогия. Ведь размеры нуклонов превышают размеры электронов примерно в десять раз (масса нуклона примерно в две тысячи раз больше, чем масса электрона), в то время как диаметр ядра в сто тысяч раз меньше диаметра внешней электронной оболочки атома, независимо от того, является ли атом легким, как атом водорода, или тяжелым, как атом урана. Поэтому нуклоны упакованы в ядро очень плотно. Не претендуя на точность, можно считать, что расстояния между ними лишь вдвое превышают их размеры.

Но тем не менее оболочечная модель позволила написать математические уравнения,

неожиданно точно описывающие некоторые известные факты. Так, модель «предсказывала», что ядра, содержащие по 2, 8, 20, 28, 40, 50, 82 и 126 нейтронов и по 2, 8, 20, 28, 50 и 82 протона, устойчивее, чем другие ядра. Однако модель не объясняла, почему именно эти числа соответствуют повышенной устойчивости ядер. Поэтому полученные числа получили наименование магических чисел, а соответствующие ядра называют магическими ядрами. Повышенная стабильность этих ядер была известна и ранее. Это был любопытный факт, нуждающийся в объяснении, но появление таких чисел из гипотезы, основанной на неясной аналогии, казалось почти чудом.

Еще более чудесными были свойства «дважды магических ядер», тех, в которых количество нейтронов и протонов одновременно характеризуется магическим числом таковы ядра гелия (два нейтрона и два протона), ядра кислорода (по 8 нейтронов и протонов), ядра кальция (по 20 нейтронов и протонов). Эти ядра действительно устойчивее всех остальных легких ядер.

Для атомов элементов, расположенных в периодической системе до кальция, совпадение расчетов, основанных на оболочечной модели, с экспериментом было потрясающе точным. После кальция оно быстро ухудшалось. Расхождение с опытом показывало, что оболочечная модель хорошо отображает реальность только для легких ядер. Но не учитывает тех процессов, роль которых возрастает по мере увеличения массы ядер, по мере увеличения количества содержащихся в них нуклонов.

Естественно, это повлекло за собой попытки усовершенствовать оболочечную модель. Пришлось уточнить закон изменения сил взаимодействия нуклонов на малых расстояниях, принять во внимание процессы, не учтенные в первоначальной модели, например увеличение роли электростатического отталкивания по мере увеличения числа протонов в ядре. Все это привело к усложнению модели и соответствующих уравнений, затруднило их решение. Но эта работа была выполнена.

Наградой физикам-теоретикам за титаническую работу было дальнейшее приближение получаемых результатов к опытным фактам и предсказание новых возможностей. Прежде всего они уточнили величины масс стабильных ядер. Оказалось, что стабильной является комбинация 30 нейтронов и 26 протонов, что соответствует ядру атома железа, порядковый номер которого 26, а масса 56. Это Действительно наиболее стабильное из всех известных ядер. Второй существенный результат — предсказание существования стабильного ядра элемента — 114 с числом нейтронов 184, а значит, с массой 298, существенно превышающей массы трансурановых элементов, синтезированных до сих пор.

Первый намек на то, что эксперимент подтверждает это предсказание, дали опубликованные Г. Н. Флеровым и П. Перелыгиным результаты изучения спонтанного деления свинца. Ожидалось, что период полураспада свинца близок к 1040 годам (огромное число, в котором после единицы стоит 40 нулей. Это миллиард, взятый четырежды по миллиарду раз и умноженный еще на 10000). Опыт привел к много меньшему числу — 3 1020 лет («Всего» миллиард миллиардов, умноженный на 300). В качестве возможного объяснения колоссального расхождения результатов опыта с прогнозом авторы выдвинули гипотезу о присутствии в природном свинце незначительной примеси экаспинца (элемента-114).

Невозможно пытаться синтезировать этот элемент при помощи существующих ускорителей — последовательное прибавление нейтронов или ускоренных ядер привело бы к уже известным или близким к ним ядрам, подверженным чрезвычайно быстрому делению.

Возрастание трудностей на этом пути иллюстрирует простое сопоставление сроков работы: на синтез тринадцати трансурановых элементов потребовалось тридцать лет. На синтез следующих шести (от элемента-102 до элемента-107) ушло еще двадцать лет, наполненных величайшими усилиями!

Позже других успех — но успех очень значительный — пришел к ученым города Дортмунда в ФРГ, где построен весьма совершенный линейный ускоритель тяжелых ионов. При длине 125 метров он разгоняет интенсивные пучки ионов до скорости 30 000

километров в секунду, что составляет десятую долю скорости света. Используя метод, предложенный в Дубне, они бомбардировали ионами железа ядра свинца. При этом было зафиксировано рождение ядер элемента-109, а затем и элемента-108.

Это выдающееся достижение приобретает особый интерес потому, что время жизни этих элементов оказалось намного большим, чем у предыдущих элементов. Современные теории не предсказывают такого эффекта. Теоретики еще не успели найти ему объяснение.

Острова устойчивости

Окрестность элемента-114, экасвинца ученые называют островом устойчивости. Проникнуть к нему через море неустойчивости, все более углубляющееся при переходе от урана-238 к первому трансурановому элементу нептуну и к последующим трансурановым элементам, можно, лишь разработав совершенно новые «средства передвижения», новые методы.

Не означает ли открытие дортмундских физиков, что самая глубокая область моря неустойчивости перейдена и физики ступили на прибрежный шельф острова устойчивости? Ответ на этот вопрос зависит от того, удастся ли подтвердить этот результат в других лабораториях.

Неожиданный путь «мореплавателям» указал Флеров. Он решил привлечь на помощь процесс деления ядер, процесс, являющийся основным препятствием на пути методов, применяемых ныне.

Флеров исходил из того, что при делении ядер изредка возникают осколки, масса которых значительно превосходит половину массы делящегося ядра. Это значит, что имеется реальная, хотя и малая, вероятность распада ядра на части, сильно различающиеся между собой по массе. Для того чтобы использовать эту возможность, следует научиться получать очень тяжелые ядра. Пусть они окажутся неустойчивыми и быстро распадаются путем деления или путем многократного альфа-распада. Пусть деление приводит большей частью к ядрам с зарядами, близкими к половине суммарного заряда ядра-мишени и ядра-снаряда. Нужно лишь научиться надежно фиксировать редкие случаи, при которых неустойчивое промежуточное ядро распадается на две части, сильно различающиеся по заряду. И искать при этом среди них ядра элемента-114, охлаждающиеся за счет испарения нейтронов. Можно надеяться и на появление осколков, сильно различающихся по массе, а затем увеличивающих свой положительный заряд путем серии бета-распадов или уменьшающих свой заряд за счет альфа-распадов. Необходимо быстро и точно идентифицировать новые трансурановые элементы.

Конечно, вероятность положительного результата окажется наибольшей при бомбардировке ядер урана ядрами урана (суммарный заряд ядра, получающегося при их слиянии, равен 184, а его масса равна 476) или ядрами ксенона (суммарный заряд — 146). Ксенон имеет меньший заряд, чем многие другие элементы, но он является единственным устойчивым тяжелым газом (самый тяжелый газ — радон — радиоактивен и распадается очень быстро). Именно поэтому, наряду с ураном, Флеров указал на ксенон. Он легче поддается ионизации, чем остальные тяжелые элементы, поэтому ионы ксенона удобнее ускорять до энергий, достаточных, чтобы его ядро слилось с ядром урана, несмотря на взаимное отталкивание их положительных зарядов. При бомбардировке урана ксеноном-132 можно вызвать деление ядер урана. Но не просто деление, а такое, при котором наиболее вероятная масса тяжелых осколков с зарядом 114 равна по оценкам 305, а для его «охлаждения» достаточно испарение от четырех до шести нейтронов.

Удастся ли синтез экасвинца, покажет будущее. Но окрестности экасвинца являются не единственным островом устойчивости. За ним, еще дальше от берега, где расположен устойчивый уран-238, оболочечная модель ядра позволяет надеяться на обнаружение второго острова устойчивости — вблизи элемента, ядра которого имеют заряд около 126.

Для их синтеза можно подобрать мишень и снаряд так, чтобы ядро, получающееся при

бомбардировке, было возбуждено не сильно и могло охладиться путем испарения небольшого числа нейтронов. Например, бомбардируя ядра тория-232 ядрами криптона-84, можно получить ядро элемента-126, охлаждающееся испарением четырех нейтронов так, что масса ядра синтезируемого элемента оказывается равной 312.

Ученые понимают, что в их работе «перелеты» — получение атомных ядер с номером, большим 114 (или 126), менее опасны, чем «недолеты» — получение атомных ядер с меньшим номером. Ведь «корректировка огня» — приближение к магическому ядру — определяется радиоактивными процессами. В случае «перелета» — это альфа-распад, уменьшающий атомный номер сразу на две единицы, а в случае «недолета» работает бета-распад, увеличивающий атомный номер только на одну единицу. Существенно и то, что альфа-распады более вероятны, а значит, происходят в тяжелых ядрах чаще, чем бета-распады, обусловленные слабым взаимодействием.

В этой связи нельзя не упомянуть еще об одном достижении, полученном на дортмундском ускорителе. Дортмундские ученые наблюдали интересные явления, происходящие, когда ядро-снаряд налетает на ядро-мишень не прямо в лоб. При косом соударении возникает узкая «прицельная зона», в которой взаимодействующие ядра образуют неустойчивую систему из двух компонентов, вращающихся вокруг общего центра масс. Эту систему можно рассматривать как особое, сильно возбужденное состояние суммарного ядра, при котором ядерные силы притяжения нуклонов в течение некоторого времени удерживают исходные ядра и противостоят кулоновским силам отталкивания одноименных зарядов и центробежным силам, стремящимся разрушить это состояние.

Такое сильно возбужденное состояние можно исследовать теоретически при помощи оболочечной модели ядра. При осуществлении эксперимента возможно предсказанное затягивание электронов, принадлежащих снаряду — иону урана и мишени — атому урана, внутрь зоны, Принадлежащей возбужденному суммарному ядру.

Теоретики и ранее указывали на возможность проникновения внутренних электронов тяжелых атомов в зону ядра. Малая вероятность такого явления не позволила до сих пор уверенно зафиксировать его в эксперименте. Совсем недавно в Дортмунде были проведены опыты с бомбардировкой ядер урана ионами урана. Энергия ускорителя недостаточна для преодоления кулоновского отталкивания обоих ядер при лобовом соударении. Но ученым удалось зафиксировать возникновение сильно возбужденного состояния ядерной материи при суммарном заряде 184. Исследования этого экзотического ядра продолжаются.

Интересной деталью эксперимента с образованием ядра элемента-184 является одновременное наблюдение электрон-позитронных пар. До сих пор рождение электрон-позитронных пар наблюдалось только в процессах с участием фотонов, обладающих очень большой энергией.

Работая над синтезом трансурановых элементов, физики предпринимают и попытки найти такие ядра в природных условиях. Об одной такой попытке — исследовании времени жизни ядер свинца — уже шла речь. Эти попытки продолжаются, ученые стремятся повторить полученные результаты другими методами и повышают точность измерения, устраняют все мешающие эффекты, например возникающие вследствие малых примесей других радиоактивных элементов.

Поиски трансурановых ведутся и в космических лучах: если эти элементы рождаются при взрывах сверхновых звезд или в ходе других подобных катастрофических процессов, то они должны достигать Земли.

Удача досталась американским физикам. Изучая следы космических частиц в толстослойных фотографических эмульсиях, поднятых за пределы земной атмосферы, они зафиксировали три следа частиц, имеющих заряд, превышающий 100, и один след с зарядом более 110. Однако такие единичные случаи не могут считаться достаточными для уверенности в правильности истолкования опытов.

В 1980 году физики были взволнованы сообщениями о том, что в кристалле оливина метеоритного происхождения обнаружен след ядра, содержащего более 110 протонов, то

есть ядра элемента, расположенного на дальнем «шельфе пролива нестабильности». Подобное сообщение появилось и в 1983 году, но происхождение этих следов еще остается неясным.

В начале восьмидесятых годов появились сообщения о синтезе элемента-106 и элемента-107. В 1983 году прошел слух об обнаружении элемента-109, в 1984 году об идентификации элемента-108. Физики проявляют при этом осторожность, связанную с тем, что в прошлом не все опубликованные результаты оказались достоверными. Пожалуй, самой сенсационной ошибкой была публикация в авторитетном американском журнале «Письма в Физическое обозрение». В 1976 году группа квалифицированных ученых сообщила об обнаружении элемента-116 и элемента-126, расположенных на таинственных островах стабильности. Однако вскоре пришлось признать, что в работе была допущена ошибка.

Ученые считают задачу синтеза и поиска неизвестных трансурановых элементов весьма важной для подтверждения и уточнения теорий строения атомных ядер. Но помимо этой задачи, у них есть и другие. Периодический закон изменений химических и физических свойств элементов, установленный Менделеевым, как обобщение опыта нашел, как мы знаем, свое обоснование в более фундаментальных физических законах. Например, в квантовых законах взаимодействия атомных ядер с электронами, частности в принципе запрета Паули, объясняющего порядок заполнения электронных оболочек атома.

Магические числа, получаемые из оболочечной модели ядра, хорошо совпадающие с опытом в широком диапазоне ядерных масс, являются доказательством того, что модель учитывает основные процессы, происходящие внутри ядра.

Но эта модель требует своего обоснования из более фундаментальных законов, подобно тому как применение принципа запрета обосновало периодическую систему элементов.

Мы знаем, что нуклоны удерживаются внутри ядра особыми, весьма большими ядерными силами. Учет действия электрических сил требуется только для уточнения соответствия расчета и опыта.

Ядерные силы, введенные Юкавой, возникают в результате того, что нуклоны постоянно обмениваются между собой особыми частицами — пионами (раньше их называли пи-мезонами). Зависимость ядерных сил от расстояния была первоначально угадана Юкавой, а затем уточнена исходя из опытов. Именно ядерные силы явились основой математического описания капельной модели, а затем и оболочечной модели ядра. Казалось, программа выполнена. Силы, действующие между нуклонами, познаны, уравнения написаны, их решения достаточно полно совпадают с опытом. Но... Наука притягательна тем, что она всегда в пути, в движении. Ученые не успокаиваются на достигнутом. Ответив на один вопрос, они задаются следующим.

Что там, в глубине?

Физики не могут остановиться на пути познания природы. Они хотят знать, как возникают ядерные силы, почему они именно таковы, какими мы их видим в различных экспериментах.

Так продолжается последовательное углубление внутрь атома, начатое Менделеевым.

Здесь уже нет места для того, чтобы следовать за учеными в глубины нуклонов. Отложим это на дальнейшее. Но чтобы у читателя не возникло чувство неудовлетворенности, сделаем краткое предварительное описание того, к чему ученые пришли за последнее время.

Оказалось, что нуклоны, то есть протоны и нейтроны, не являются воистину элементарными частицами. Они состоят или, вернее, образованы из более элементарных частиц, название которых — кварки. Известно, что в природе существуют шесть различных кварков. Более того, они (каждый из них) могут находиться в различных состояниях. Между кварками действуют мощнейшие силы, удерживающие их внутри нуклонов и внутри других

родственных частиц, составляющих вместе с нуклонами целое семейство, имеющее общее название — адроны.

Взаимодействие между кварками называется сильным взаимодействием. Оно, подобно ядерным силам, реализуется путем обмена особыми частицами, переносчиками сильного взаимодействия. Эти частицы названы глюонами (от английского «глю» — «клей»). Они как бы склеивают кварки, образуя таким путем протоны, нейтроны и другие адроны.

Теперь осталось узнать немного. Необходимо понять, существует ли связь между сильными взаимодействиями и ядерными силами?

Эта задача еще не решена. Это дело будущего. Но уже сейчас ученые работают, следуя по многообещающему пути — пути аналогий. Проследим за ходом их мыслей.

Атом образован за счет электростатических сил, действующих между ядром и электронными оболочками. В нормальном состоянии атом нейтрален. Это значит, что положительный заряд ядра скомпенсирован суммой отрицательных зарядов электронов так хорошо, что издали невозможно обнаружить присутствие в атоме заряженных частиц. Мы знаем, что они есть, что ядро и электроны заряжены. Нужно лишь сделать еще шаг. Нужно изучить свойства атомов, наблюдая их с близкого расстояния. При этом, конечно, картина изменится.

Здесь физика призывает на помощь химию, можно сказать — физика порождает химию. Даже нейтральные атомы (если это не атомы инертных газов с их замкнутыми внешними электронными оболочками) взаимодействуют между собой так, чтобы обеспечить еще более полную компенсацию электрических зарядов и спинов электронов. Так, в результате взаимодействия электронов двух или нескольких атомов образуются молекулы, еще более скомпенсированные, еще более нейтральные структуры. Но и здесь компенсация оказывается не идеальной. Если две молекулы сближаются между собой очень тесно, то они «чувствуют», что их электрические поля или силы скомпенсированы не полностью. Остатки этих сил притягивают молекулы так сильно, что они объединяются в большие коллективы.

Если температура не слишком велика, объединение продолжается. Молекулы газов, не чувствующие друг друга на расстоянии, взаимодействующие в газах только при случайных соударениях, при понижении температуры образуют жидкость, а при еще более низких температурах — твердые тела. Тепловое движение оставляет молекулам, входящим в состав жидкостей и твердых тел, какую-то долю независимости. В жидкостях они могут перемещаться и вращаться, в твердых телах они способны колебаться относительно положений своего равновесия, относительно своих соседей. Те из них, что находятся на поверхности, могут даже оторваться от коллектива — испариться.

Но если охлаждение происходит медленно, то из жидкости возникают кристаллы. Оказывается, что и за пределы молекул выходят достаточно сильные остатки их внутренних электрических полей. Полей, которые скомпенсировались при образовании атомов и еще полнее скомпенсировались при образовании молекул. Теперь компенсируются остатки, выходящие за пределы молекул. Они заставляют молекулы выстраиваться в регулярные структуры, образующие кристаллы. Во многих отношениях кристалл ведет себя как огромная молекула, состоящая из большого количества однотипных молекул или ионов.

Опираясь на нашу аналогию, обратимся снова к кваркам. Нечто подобное происходит и в тех глубинах материального мира, где действуют кварки и глюоны.

Под влиянием сильного взаимодействия вполне определенные комбинации кварков и глюонов образуют все известные ядерные частицы — протоны, нейтроны и остальные адроны. При этом кварки обмениваются глюонами аналогично тому, как протоны и нейтроны, обмениваясь пионами, образуют ядра атомов. В ходе такого обмена сильные взаимодействия в существенной мере компенсируются. Их невозможно обнаружить на большом расстоянии от нуклона. Ядерные силы являются нескомпенсированным остатком сильных взаимодействий. На близких расстояниях ядерные силы, эти остатки сильных взаимодействий, много сильнее сил электрического отталкивания. Поэтому они удерживают протоны и нейтроны внутри ядер. Они могут привести и к слиянию ядер, если эти ядра

окажутся на достаточно близком расстоянии. Например, при сближении ядер-снарядов с ядрами-мишени.

То, что изложено здесь, это картина, набросанная на основе аналогий. Ученые создают при помощи этой грубой модели все более точные модели, которые рано или поздно превратятся в математические модели и уравнения. Решение этих уравнений позволит объяснить структуру ядер, Порядок перехода от одночастичного ядра атома водорода — протона — к двухчастичному (протон плюс нейтрон) ядру атома дейтерия — дейтону, к трехчастичному (протон плюс два нейтрона) ядру атома трития — тритону или ядру гелия-3, содержащему два протона и один нейтрон, и так далее, к урану и трансурановым элементам.

Когда такая математическая модель будет построена и соответствующие уравнения будут решены, полученные решения позволят наконец понять, почему ядра образуются такими, какими мы их видим в соответствии с таблицей Менделеева. Мы ответим на вопрос: где предел этой таблицы? Мы будем знать, какие трансурановые элементы еще можно синтезировать. Действительно ли существует остров или острова стабильности и, если они существуют, то как следует до них добираться?..

Мы рассказали только начало истории познания строения материи. Мы оттолкнулись только от одного удивительного предчувствия — прозрения гениального русского химика Менделеева. Эта история продолжается, она вовлекает в сферу своих интересов все новые разумы, она вдохновляет на научные свершения юных — за ними следующее слово, за ними новые предчувствия и свершения.

ГЛАВА 2

ЯЗЫК МОЛЕКУЛ

Национальной науки нет, как нет национальной таблицы умножения.

А. П. Чехов

Цвет неба

Объяснить происхождение цвета неба старались уже средневековые ученые. Некоторые из них предполагали, что синий цвет есть истинный цвет воздуха или отдельных его частей. Другие считали, что настоящий цвет неба черный, такой, каким он кажется ночью. Они утверждали, что голубая окраска, видимая днем, есть результат смешения белого цвета солнечных лучей и черного межзвездного пространства.

Этим вопросом заинтересовался и великий английский ученый Исаак Ньютон. Он сразу отверг предшествующие теории. Проводя многочисленные опыты со смешением цветов, Ньютон убедился в том, что смесь белого и черного цвета никогда не образует голубого. Наблюдения заставили его отбросить и предположение о том, что синий цвет есть истинный цвет воздуха. Ведь в этом случае Солнце и Луна на восходе и закате должны казаться не красными, как это есть в действительности, а голубыми. Такими выглядели бы и вершины отдаленных снежных гор. Если бы воздух был окрашен даже очень слабо, то толстый слой его по своим свойствам был бы таким же, как окрашенное стекло. Но если смотреть сквозь окрашенное стекло, то все предметы кажутся такого же цвета, как это стекло. Однако отдаленные снежные вершины представляются нам розоватыми, а вовсе не голубыми.

Ньютон предположил, что голубая окраска неба и обыкновенная радуга вызываются одними и теми же причинами. Он считал, что это результат особого рассеивания света на мелких водяных пузырьках, которые, по его мнению, всегда присутствуют в воздухе.

Радуга действительно образуется при прохождении солнечных лучей через рой дождевых капель. Свет Солнца входит в каплю, преломляясь на ее поверхности, отражается от ее задней границы и вновь преломляется, выходя из капли. При этом белый свет, излучаемый Солнцем, распадается на составляющие его цвета. Каждый из них распространяется в определенном направлении. Семь цветов радуги кажутся исходящими из

узких дугообразных участков небосвода. При этом Солнце находится за спиной наблюдателя.

Но гипотеза Ньютона о происхождении голубого цвета неба теперь кажется нам очень странной. Известно, что в ясную погоду, когда небо сияет особой голубизной, в нем нет водяных капель. Однако в то время считалось, что водяные пары собираются в воздухе в виде маленьких пузырьков, напоминающих мельчайшие мыльные пузыри. Ньютон, как и другие ученые того времени, думал, что эти пузырьки в течение длительного времени плавают в воздухе.

Много позже идею Ньютона опровергли метеорологи. Наблюдения и измерения доказали, что водяных пузырьков, присутствием которых Ньютон объяснял окраску неба, в действительности не существует.

В таком состоянии находился вопрос о голубом цвете неба, когда за его разрешение взялся английский физик Релей.

Пылинки вместо пузырьков

Релей занимался оптикой, а люди, посвятившие свою жизнь науке о свете — оптике, много времени проводят в темноте. Посторонний свет мешает оптическим исследованиям, поэтому окна оптической лаборатории почти всегда затянуты черными светонепроницаемыми шторами.

Человеку, впервые входящему в оптическую лабораторию, прежде всего бросаются в глаза пучки света, вырывающиеся из приборов. Эти пучки четко видны в окружающей тьме. Они наглядно подтверждают, что свет распространяется прямолинейно.

Однако для того чтобы убедиться в прямолинейности распространения света, не обязательно заходить в оптическую лабораторию. То же самое можно увидеть в солнечный день в любой затемненной комнате. Через щели ставней или занавесей пробиваются яркие солнечные лучи, пересекающие комнату и падающие на стены или на пол.

Прямолинейность распространения света стала известной людям в глубокой древности именно из таких простейших наблюдений. Можно считать твердо установленным, что свет в пустоте распространяется по прямой линии.

Но как согласовать с прямолинейным распространением света тот факт, что мы видим световые лучи, глядя на них сбоку? Ведь солнечный свет в темной комнате идет от щели в ставне к полу. Наш глаз расположен в стороне от его пути, и, тем не менее мы видим этот свет. Мы видим и столб света от прожектора, направленного в небо. Значит, часть света отклоняется от прямолинейного пути и распространяется в стороны, попадая в наши глаза.

Присмотревшись, легко обнаружить множество пылинок, непрерывно кружащихся на пути световых лучей. Некоторые из них сравнительно велики. Большинство же имеет очень малые размеры. Все они ярко освещены и поэтому выделяются на темном фоне. В наш глаз попадают лучи, рассеиваемые пылинками, лучи, которые, встречая препятствия, поворачивают свой путь и распространяются по прямой от рассеивающей пылинки к нашему глазу. Возможно, что вид пылинок, танцующих в световом луче, послужил Релею исходной точкой для построения новой теории происхождения окраски неба.

В 1871 году Релей высказал предположение, что голубой цвет неба вызван рассеянием солнечных лучей на малых частицах, плавающих в воздухе. Рассеяние света малыми частицами было открыто еще в 1851 году физиком-экспериментатором Е. Брюкке. Математический расчет показал Релею, что маленькие частицы, плотность которых отличается от плотности воздуха, рассеивают свет тем сильнее, чем короче длина волны света. Поэтому интенсивность рассеянного света чрезвычайно быстро возрастает с уменьшением длины волны. Если размеры пылинки меньше, чем длина световой волны, то при уменьшении длины волны света в 2 раза интенсивность рассеянного света возрастает в 16 раз.

Длина волны фиолетового света примерно вдвое меньше, чем длина волны красного

света, — значит, фиолетовые лучи рассеиваются в 16 раз сильнее, чем красные. Вот объяснение голубого цвета неба, красных зорь и голубой дымки!

На восходе и закате, когда солнечные лучи проходят через наибольшую толщу воздуха, фиолетовые и синие лучи, говорит теория Релея, рассеиваются наиболее сильно. При этом они отклоняются от прямого пути и не попадают в глаза наблюдателю. Наблюдатель видит главным образом красные лучи, которые рассеиваются гораздо слабее. Поэтому на восходе и закате Солнце кажется нам красным. По этой же причине кажутся розовыми и вершины отдаленных снежных гор. Глядя на чистое небо, мы видим сине-голубые лучи — коротковолновую часть солнечного света, — отклоняющиеся от прямолинейного пути вследствие рассеяния и попадающие в наши глаза. Голубая дымка, которую мы иногда видим у горизонта, тоже является результатом преимущественного рассеяния коротковолнового света.

Релей показал, что появление в воздухе частиц, размеры которых превосходят длину волны света, ослабляет голубой цвет неба. Рассеяние света на крупных частицах слабее зависит от длины волны и поэтому не вызывает изменения его окраски. При рассеянии света на крупных частицах как рассеянный, так и прошедший свет остается белым. Поэтому появление в воздухе крупных частиц сообщает небу белесый цвет, а скопление большого количества мелких капелек обуславливает белый цвет облаков и тумана.

Мельчайшие частицы дыма, поднимающиеся над концом горящей папиросы, имеют размеры меньшие, чем длина световой волны, и, в соответствии с теорией Релея, рассеивают преимущественно фиолетовый и синий свет. Но при прохождении через узкие каналы в толще табака частицы дыма склеиваются между собой (коагулируют), объединяясь в более крупные комочки. Размеры многих из них становятся больше, чем длина волны видимого света, и они рассеивают все волны света примерно одинаково. Именно поэтому дым, выходящий из мундштука папиросы, кажется белесым.

Первоначальная теория Релея еще основывалась на отвергнутом впоследствии представлении об упругом светонесущем эфире. В 1899 году он сформулировал задачу о голубом цвете неба применительно к электромагнитной теории света и решил ее с такой полнотой, что она лежит в основе всех современных представлений о рассеянии света малыми частицами.

Но, зная из опыта, что голубой цвет неба тем более чист и ярок, чем чище атмосфера, Релей пришел к заключению, что окраска неба обусловлена не загрязнениями, а самими молекулами воздуха. Молекулы воздуха — вот те мельчайшие неоднородности, которые рассеивают свет Солнца. А так как молекулы очень малы, то они рассеивают волны фиолетового и голубого света гораздо сильнее, чем все остальные. Эта теория, построенная для одиночных молекул, могла быть применена к газу, только если он очень разрежен, то есть его молекулы расположены так далеко одна от другой, что они рассеивают свет совершенно независимо. Но в действительности в каждом кубическом сантиметре воздуха так много молекул и они расположены так близко одна к другой, что световые волны, рассеянные в стороны отдельными молекулами, должны полностью гасить друг друга. В соответствии с расчетом должна оставаться только волна, бегущая вперед без всякого рассеяния. Но этот расчет, опровергающий теорию Релея, в свою очередь имел слабое место: он был проведен лишь для неподвижных молекул. В случае движущихся молекул, как казалось Релею, все должно быть иначе. Он был убежден, что неизбежные тепловые движения молекул препятствуют взаимному гашению рассеянных волн. Поэтому Релей думал, что голубой цвет неба все же может быть объяснен рассеянием света на молекулах.

Впоследствии мы еще вернемся к этому вопросу. Сейчас для нас важно лишь то, что релейская теория рассеяния света молекулами связала яркость свечения неба с числом молекул, содержащихся в каждом кубическом сантиметре воздуха. Это дало возможность проверить правильность теории на опыте. Впервые такой опыт выполнил в 1906 году американский астрофизик Аббо, изучавший голубое свечение неба в обсерватории на горе Маунт-Вильсон. Обработка результатов измерения яркости свечения неба показала, что в

каждом кубическом сантиметре содержится огромное количество молекул. Полученное число обычно записывают так: $27 \cdot 10^{18}$ (после числа 27 следует приписать 18 нулей). Это значит, что в каждом кубическом сантиметре воздуха содержится 27 миллиардов раз по миллиарду молекул. Если раздать молекулы, содержащиеся в одном кубическом сантиметре воздуха, всем людям, населяющим земной шар, то каждому достанется по 5 с лишним миллиардов этих молекул.

Впоследствии аналогичные измерения неоднократно с успехом повторялись другими учеными. Полученный результат был чрезвычайно важным. Дело в том, что количество молекул в кубическом сантиметре газа можно измерять по крайней мере двумя десятками разных способов на основе совершенно различных и независимых между собой явлений. Все они приводят к близко совпадающим результатам и дают число, называемое числом Лошмидта. Оно с большой точностью совпадает с числом, полученным при измерении свечения неба. Таким образом, измерения показали, что молекулярное рассеяние света действительно существует.

Казалось, теория Релея была надежно подтверждена опытом; все ученые считали ее безупречной. Она стала общепризнанной и вошла во все учебники оптики.

Тем более удивительно, что в 1907 году на страницах известного научного журнала вновь был поставлен вопрос: почему же небо голубое?

Тайна природы раскрыта

Человеком, указавшим на недостаточность общепризнанной теории, был замечательный русский ученый Леонид Исаакович Мандельштам.

Вот как охарактеризовал Л. И. Мандельштама академик С. И. Вавилов:

«Природа одарила Леонида Исааковича совсем необычным прозорливым тонким умом, сразу замечавшим и понимавшим то главное, мимо чего равнодушно проходило большинство. Так была понята флуктуационная сущность рассеяния света, так появилась идея об изменении спектра при рассеянии света, ставшая основой открытия комбинационного рассеяния».

История раскрытия тайны голубого цвета неба прекрасно иллюстрирует слова академика С. И. Вавилова.

Мандельштам обнаружил принципиальную трудность в самой основе теории Релея. Он показал, что простой факт движения молекул не может воспрепятствовать взаимному гашению световых волн, рассеиваемых в стороны отдельными молекулами. Дело в том, что если газ однороден и плотность его достаточно высока, то движение молекул не изменяет средней плотности газа. Оно ведет лишь к замене одних молекул другими, а так как молекулы одинаковы, то такая замена не приводит ни к какой существенной разнице. В этих условиях движущиеся молекулы рассеивают свет так же, как неподвижные, а значит, волны света, рассеянного отдельными молекулами, будут погашены в результате их взаимодействия.

Проще всего уяснить себе суть дела на примере волн на поверхности воды. Если волна встречается с неподвижными или плавающими предметами (сваи, бревна, лодки и т. п.), то во все стороны от этих предметов разбегаются мелкие волны. Это есть не что иное, как рассеяние. Часть энергии падающей волны расходуется на возбуждение вторичных волн, которые вполне аналогичны рассеянному свету в оптике. При этом первоначальная волна ослабляется — она затухает.

Плавающие предметы могут быть намного меньше, чем длина волны, бегущей по воде. Даже мелкие зерна будут вызывать вторичные волны. Конечно, по мере уменьшения размеров частиц образуемые ими вторичные волны ослабевают, но они все же будут забирать энергию основной волны.

Примерно так представлял себе процесс ослабления световой волны при прохождении ее через газ Планк, но роль зерен у него играли молекулы газа.

Процесс рассеяния света, несомненно, гораздо сложнее, чем рассеяние волн на воде, — ведь свет это не механические волны, а электромагнитные колебания, — но наблюдение над обычными волнами помогает уяснить законы оптики.

Планк поставил своей целью с помощью математического расчета объяснить причину ослабления света при прохождении его через оптически однородное вещество, то есть через вещество, не обладающее мутностью. Для этого он построил теорию, в которой принималось за основу, что сами молекулы вещества, через которое проходит свет, являются источниками вторичных волн. На создание этих вторичных волн, утверждал он, тратится часть энергии проходящей волны, которая при этом ослабляется. Мы видим, что эта теория основывается на релеевской теории молекулярного рассеяния и опирается на ее авторитет. Этой работой Планка заинтересовался Мандельштам.

Ход мыслей Мандельштама также можно пояснить с помощью примера волн на поверхности воды. Нужно лишь рассмотреть его более внимательно. Уже указывалось, что даже мелкие зерна, плавающие на поверхности воды, являются источниками вторичных волн. Но что будет, если насыпать эти зерна так густо, что они покроют всю поверхность воды? Тогда окажется, что отдельные вторичные волны, вызванные многочисленными зернами, будут складываться так, что они полностью погасят те части волн, которые бегут в стороны и назад, и рассеяние прекратится. Останется лишь волна, бегущая вперед. Она побежит вперед, совершенно не ослабляясь. Единственным результатом присутствия всей массы зерен окажется некоторое уменьшение скорости распространения первичной волны. Особенно важно, что все это не зависит от того, неподвижны ли зерна или они движутся по поверхности воды.

Мандельштам произвел математический расчет для случая, когда число молекул в воздухе так велико, что даже на таком маленьком участке, как длина световой волны, содержится очень большое число молекул. Оказалось, что при этом вторичные световые волны, возбуждаемые отдельными молекулами, складываются так же, как волны в примере с зернами на поверхности воды. Значит, в этом случае световая волна распространяется без рассеяния и ослабления, но с несколько меньшей скоростью. Это опровергало теорию Релея, считавшего, что движение рассеивающих частиц во всех случаях обеспечивает рассеяние волн и основанную на ней теорию Планка.

Так под фундаментом теории рассеяния был обнаружен песок. Все величественное здание заколебалось и грозило рухнуть.

Но как обстоит дело с определением числа Лошмидта из измерений голубого свечения неба? Ведь этот опыт подтверждал релеевскую теорию рассеяния?

«Это совпадение должно рассматриваться как случайное», — писал Мандельштам в своей работе «Об оптически однородных и мутных средах».

Мандельштам показал, что беспорядочное движение молекул не может сделать газ однородным. Наоборот, в реальном газе всегда имеются мельчайшие разрежения и уплотнения, образующиеся в результате хаотического теплового движения. Вот они-то и объясняют рассеяние света. В той же работе Мандельштам писал: «Если среда оптически неоднородна, то, вообще говоря, падающий свет будет рассеиваться и в стороны».

Что же является причиной этой оптической неоднородности?

Для того чтобы ответить на вопрос, снова вспомним, что молекулы всех веществ не неподвижны. Даже если в веществе не происходит видимых движений, его молекулы непрерывно движутся. Это движение молекул называется тепловым движением, так как оно вызывает у нас ощущение тепла. Чем сильнее движутся молекулы вещества, тем более теплым оно нам кажется.

В газах и жидкостях молекулы не закреплены в определенных местах пространства, как это имеет место в твердых телах. Поэтому молекулы беспорядочно перемещаются, сталкиваясь друг с другом и описывая причудливые зигзагообразные линии. Беспорядочный характер этого движения приводит к тому, что в различных местах пространства на короткое время скапливается больше молекул, чем в других. Однако эти уплотнения быстро

рассеиваются, возникая в других местах. Так же беспорядочно возникают и небольшие кратковременные разрежения.

Большая заслуга Мандельштама заключается в том, что он доказал, что предположение об однородности газа несовместимо с фактом рассеяния в нем света. Он понял, что голубой цвет неба доказывает, что однородность газов только кажущаяся. Это значит, что газы однородны только при исследовании грубыми приборами, такими, как барометр, весы или другие приборы, на которые воздействуют сразу многие миллиарды молекул. Но световой луч ощущает несравнимо меньшее количество молекул, измеряемое лишь десятками тысяч. И этого достаточно, чтобы бесспорно установить, что плотность газа непрерывно подвергается маленьким местным изменениям. Поэтому однородная, с нашей «грубой» точки зрения, среда в действительности неоднородна. С точки зрения света она кажется мутной и поэтому рассеивает свет.

Так была окончательно объяснена причина голубого цвета неба.

Случайные местные изменения свойств вещества, образующиеся в результате теплового движения молекул, теперь носят название флуктуации. Выяснив флуктуационное происхождение молекулярного рассеяния света, Мандельштам проложил дорогу новому методу исследования вещества — флуктуационному, или статистическому, методу, впоследствии развитому Смолуховским, Лорентцом, Эйнштейном и им самим в новый крупный отдел физики — статистическую физику.

Казалось бы, что может быть связано между собой меньше, чем обыкновенный камертон и теория рассеяния света?

Сейчас мы расскажем о прекрасном опыте с камертоном, который придумал и показывал на своих лекциях Мандельштам.

Этот опыт предназначен для демонстрации явления модуляции. Модуляцией называется медленное воздействие на колебательный процесс. Простейшим примером модуляции является периодическое изменение силы звука.

Вот как ставится этот опыт. Берут два одинаковых камертона, дающих одинаковый тон, скажем соответствующий частоте колебаний 500 периодов в секунду. Кроме этих камертонов, берут еще два: один — дающий звук с частотой 497 периодов в секунду и другой — с частотой в 503 периода в секунду.

Если ударить по камертону, дающему тон 500 периодов в секунду, и затем заглушить его рукой, можно услышать тихий звук, издаваемый вторым таким же камертоном. Это есть явление резонанса. Камертон приводится в заметное колебание тем звуком, который он способен испускать. Два других камертона, частоты которых различаются от частоты звука всего на три периода в секунду, не будут звучать и не обнаружат заметных колебаний. Это характеризует остроту, с которой камертоны отличают даже столь близкие между собой колебания.

Видоизменим опыт. Попробуем теперь заставить звучать тот же камертон, изменяя силу его звука в 3 раза в секунду. Для этого достаточно 3 раза в секунду помещать заслонку перед его резонансным ящиком. Слушатели отчетливо воспримут изменение силы доходящего до них звука. Однако, заглушив после этого камертон, можно убедиться в том, что теперь возбуждились и начали звучать также те камертоны, которые в первом случае оставались в покое. Частоты их отличаются от частоты первого камертона на 3 периода в секунду.

Итак, опыт показывает, что, модулируя звук, то есть изменяя его силу, можно добиться возбуждения камертонов, частота которых отличается от частоты возбуждающего камертона как раз на частоту модуляции. Следовательно, в звуке, издаваемом модулированным камертоном, кроме его собственной частоты, появляются новые частоты, порожденные модуляцией.

Предсказание

Глубокое понимание колебательных процессов помогло Мандельштаму отыскать аналогичные явления и в такой далекой на первый взгляд от радиотехники и акустики области, как рассеяние света. Он первый понял, что в явлении рассеяния света можно обнаружить черты, родственные процессам, хорошо изученным в радиотехнике и акустике.

Этот вывод оказался очень плодотворным. В 1918 году Мандельштаму удалось использовать эту идею для дальнейшего развития теории молекулярного рассеяния света. Он рассуждал примерно так. Молекулярное рассеяние света обусловлено оптическими неоднородностями, вызываемыми местными случайными изменениями плотности, температуры и т. п. Но величина этих случайных изменений меняется во времени. Поэтому должна изменяться во времени и интенсивность (сила) рассеянного света. Это значит, что рассеянный свет испытывает модуляцию. Следовательно, если в среду попадает монохроматический свет (то есть свет, обладающий одной определенной частотой), то в рассеянном свете должны, кроме этой частоты, появиться и другие частоты, обусловленные модуляцией.

Ни один из ученых в то время не наблюдал подобного изменения частоты рассеянного света. Не имел возможности проверить выводы своей теории и сам Мандельштам — трудные условия первых лет революции, иностранной интервенции и гражданской войны препятствовали организации экспериментов, необходимых для обнаружения столь малых изменений частоты.

В 1925 году Мандельштам стал заведующим кафедрой в Московском университете. Здесь он встретился с выдающимся ученым и искусным экспериментатором Григорием Самуиловичем Ландсбергом. С тех пор обоих ученых связала не только общая работа, но и личная дружба. Они совместно продолжили штурм тайн, скрытых в слабых лучах рассеянного света.

Оптические лаборатории университета в те годы были очень бедны приборами. Молодая советская промышленность преодолевала большие трудности и поэтому не могла еще уделять достаточно внимания производству специальных оптических приборов. В университете не оказалось ни одного прибора, способного обнаружить те маленькие различия в частотах падающего и рассеянного света, которые предсказывала теория.

Однако это не остановило исследователей. Для того чтобы увеличить силу рассеянного света, они взяли в качестве источника света ртутную лампу, в которой светятся пары ртути, и решили работать не с газами, а с прозрачными твердыми телами. Ведь рассеяние тем больше, чем плотнее вещество. А в твердых телах под влиянием тепловых колебаний тоже должны возникать флуктуации плотности, сопровождающиеся рассеянием света. Но молекулярное рассеяние в твердых телах тогда никем еще не наблюдалось, и никто не знал, какое вещество следует выбрать. Начались кропотливые поиски. Наиболее подходящими оказались кристаллы кварца, среди которых можно было найти крупные, однородные и чистые образцы. Не обладая мощной аппаратурой для спектрального анализа, ученые избрали остроумный обходный путь, который должен был дать возможность воспользоваться имеющимися приборами. Для этой цели они использовали явление резонанса.

Основной трудностью в работе было то, что на слабый свет, вызванный молекулярным рассеянием, накладывался намного более сильный свет, рассеянный небольшими загрязнениями и другими дефектами тех образцов кристаллов, с которыми проводились опыты. Исследователи решили воспользоваться тем, что рассеянный свет, образованный дефектами кристалла и отражениями от различных частей установки, точно совпадает по частоте с падающим светом. Их же интересовал только свет с измененной, в соответствии с теорией Мандельштама, частотой. Таким образом, задача состояла в том, чтобы на фоне намного более яркого мешающего света выделить слабый свет измененной частоты, вызванный молекулярным рассеянием.

Идея метода привлекала своей простотой: надо поглотить свет неизменной частоты и пропустить в спектральный аппарат только свет измененной частоты, отличающейся от первоначальной лишь на несколько тысячных долей процента. Эту идею можно реализовать

на основе старого наблюдения, сделанного Кирхгофом. Он заметил, что каждый атом вещества, находящегося в газообразном состоянии, способен излучать световые волны только вполне определенных частот. Вместе с тем этот атом способен и поглощать свет только тех частот, которые он сам может излучать. Поэтому, например, при прохождении света через сосуд, наполненный парами ртути, будет сильно рассеиваться и поглощаться только такой свет, который может испускаться парами ртути, находящимися в лампе. В результате свет от ртутной лампы при прохождении через сосуд, наполненный парами ртути, будет сильно ослабляться, а свет, обладающий другими частотами, например свет от неоновой лампы, пройдет через этот сосуд без заметного ослабления. Без заметного поглощения пройдет через ртутные пары и та часть рассеянного света ртутной лампы, частота которой окажется измененной при рассеянии на случайно возникающих и рассасывающихся неоднородностях.

Мандельштам рассуждал так: свет, рассеянный в кристалле, состоит из двух частей: из слабого света измененной частоты, обусловленного молекулярным рассеянием (исследование этой части являлось целью ученых), и из гораздо более сильного света неизменной частоты, вызванного как молекулярным рассеянием, так и главным образом посторонними причинами, а именно загрязнениями и другими дефектами кристалла (эта часть была вредной, она затрудняла исследование). Для того чтобы избавиться от мешающей части света, весь рассеянный свет следует пропускать через сосуд с парами ртути. При этом мешающий свет неизменной частоты существенно ослабляется, а свет измененной частоты проходит без заметного ослабления. Этот свет направлялся в обычный спектроскоп для дальнейшего исследования.

Два года длились подготовительные опыты, выбирались наиболее чистые образцы кристаллов, совершенствовалась методика, устанавливались признаки, позволяющие бесспорно отличать молекулярное рассеяние от рассеяния на случайных включениях и неоднородностях кристалла.

Замечательное открытие

В 1927 году начались решающие опыты. Результаты их были необычайны. Они привели к открытию совершенно нового физического явления. В процессе исследования полученных фотографий спектра — спектрограмм наряду с спектральными линиями неизменной частоты были обнаружены слабые линии со значительно большим изменением частоты, чем это ожидалось на основании теории.

Началась тщательная проверка. Разнообразные контрольные опыты показали, что ошибок нет. В рассеянном свете действительно присутствуют слабые линии, заметно отличающиеся по частоте от падающего света.

Уже в процессе проверки стало ясно, что наблюдаемое на опыте значительное изменение частоты есть следствие процессов намного более быстрых, чем процессы рассасывания случайных неоднородностей. Ведь даже опыт с камертонами показывает, что, чем выше частота модуляции, тем больше изменение частоты звука.

Снимки, в которых выявились новые линии, были получены осенью 1927 года. Однако контрольные опыты продолжались. Советские ученые занялись всесторонней проверкой и тщательным изучением нового явления. После того как в феврале 1928 года в результате обработки многих фотографий спектров были получены точные числовые результаты и установлены закономерности в расположении новых линий, Мандельштам дал теоретическое объяснение их происхождения.

Глубокая интуиция и ясный аналитический ум сразу подсказали ему, что обнаруженные линии вызваны не теми межмолекулярными силами, которые выравнивают случайные неоднородности, а другими силами, действующими внутри молекул. Эти силы обуславливают внутримолекулярные колебания — колебания атомов, образующих каждую молекулу. Такие колебания обладают гораздо более высокой частотой, чем те колебания

плотности, которые сопровождают образование и рассасывание случайных неоднородностей среды (в этих колебаниях каждая молекула участвует как одно целое). Поэтому изменение частоты света, вызванное модуляцией, имевшей причиной внутримолекулярные колебания, намного превосходит то изменение, которое предсказывала теория, учитывающая только процесс рассасывания неоднородностей.

Итак, при попытке обнаружить малое изменение частоты рассеянного света, вызванное межмолекулярными силами (это явление предсказал Мандельштам еще в 1918 году), было обнаружено значительно большее изменение частоты, вызванное внутримолекулярными силами.

Таким образом, для объяснения нового явления, которое получило название «комбинационное рассеяние света», достаточно было теорию молекулярного рассеяния, созданную Мандельштамом, дополнить данными о влиянии внутримолекулярных колебаний. Новое явление оказалось открытым в результате развития идеи Мандельштама, сформулированной им в 1918 году.

6 мая 1928 года, после серии контрольных опытов, Мандельштам и Ландсберг сообщили о своем открытии в письме в редакцию журнала «Естественные науки». К письму была приложена фотография спектра.

Кратко изложив историю поисков малых изменений длины волны света при рассеянии его в кристаллах, исследователи сообщали об открытом ими явлении, заключающемся в возникновении в спектре новых линий, далеко отстоящих от спектральных линий падающего света. Здесь же было приведено объяснение природы этого явления: в кристалле существуют колебания молекул, соответствующие линиям поглощения кварца, расположенным за красной границей видимого спектра. Эти линии были исследованы Рубенсом и Никольсом еще в 1897 году. Именно поэтому в спектре рассеянного света возникают новые линии, сдвинутые от первоначальных. Расчет сдвига частоты рассеянного света, проведенный в соответствии с этим предположением, поразительно точно совпал с результатами измерений.

В заключение авторы письма указывали, что в настоящее время они не могут сказать, связано ли открытое ими явление с явлениями, незадолго перед этим описанными Раманом и Кришнаном, ибо описание это дано в очень общем виде.

Буря

В чем же состоит явление, описанное индийскими учеными?

31 марта 1928 года в среде ученых Лондона разыгралась «буря». В этот день вышел из печати очередной номер английского журнала «Природа».

Но хотя волны этого научного циклона разбегались по свету из столицы Великобритании вместе с тоненькими книжками журнала, центр его находился в Индии. Оттуда 16 февраля ученые Ч. В. Раман и К. С. Кришнан отправили письмо с коротким описанием своего открытия.

Оптика — одна из старейших областей науки, поэтому в XX веке открыть в ней что-нибудь неведомое удавалось нечасто. Не удивительно, что, прочитав заглавие «Новый тип вторичного излучения», физики заинтересовались содержанием письма индийских ученых. В письме сообщалось о том, что попытка авторов найти оптический аналог эффекта Комптона увенчалась успехом.

Еще не улеглись страсти, вызванные в 1923 году открытиями американского физика Комптона, который, изучая прохождение рентгеновских лучей через вещество, обнаружил, что часть этих лучей, рассеиваясь в стороны от первоначального направления, увеличивает длину своей волны. Это явление можно было объяснить только законами квантовой физики, поэтому открытие Комптона явилось одним из решающих доказательств правильности молодой квантовой теории. И вот через пять лет индийские физики обнаружили нечто подобное в видимом свете.

Это был очень трудный опыт, так как ожидаемый эффект должен был быть

чрезвычайно малым. Для опыта понадобился очень яркий источник света. Авторы решили использовать Солнце, собрав его лучи с помощью телескопа, имевшего объектив диаметром 18 сантиметров. Собранный свет они направили на сосуды, в которых помещались жидкости и газы, тщательно очищенные от пыли и других загрязнений.

Но обнаружить ожидаемое малое удлинение волны рассеянного света, пользуясь белым солнечным светом, содержащим практически все возможные длины волн, было безнадежно. Поэтому ученые решили воспользоваться светофильтрами. Они поставили перед объективом сине-фиолетовый фильтр, а наблюдали рассеянный свет через желто-зеленый фильтр. Эти фильтры, поставленные друг за другом, должны поглощать весь свет. Ведь желто-зеленый фильтр поглощает сине-фиолетовые лучи, пропускаемые первым фильтром.

Но в рассеянном свете Раман и Кришнан обнаружили лучи, проходящие через второй фильтр. Это мог быть оптический эффект Комптона, то есть могло быть, что при рассеянии сине-фиолетовый свет изменял свою окраску и становился желто-зеленым. Но это нужно было еще доказать. Ведь могли быть и другие причины, вызывающие появление желто-зеленого света. Например, он мог появиться в результате люминесценции, слабого свечения, которое часто возникает в жидкостях и твердых телах под действием света, тепла и других причин. Очевидно было одно: свет этот рожден вновь, он не содержался в той части солнечного света, которая прошла через первый фильтр, а затем через рассеивающее вещество.

Ученые повторили свой опыт с шестью различными жидкостями и двумя типами паров. Они пришли к выводу, что ни люминесценция, ни другие причины не играют здесь роли. Факт увеличения длины волны видимого света при рассеянии его в веществе казался им установленным.

Но светофильтры позволяют лишь обнаружить изменение длины волны. Чтобы измерить величину этого изменения, нужно применить спектроскоп — прибор, позволяющий измерять длину волны исследуемого света. И исследователи начали новую работу. Они провели измерения, применив в качестве источника света электрическую дугу, горевшую в парах ртути. Спектроскоп показал, что в рассеянном свете рядом со спектральными линиями ртути был виден свет с увеличившейся длиной волны. Особенно интересным и неожиданным было то, что область света с увеличившейся длиной волны была отделена от первоначальной спектральной линии темным промежутком. Предварительные наблюдения показали, что характер рассеянного света остается одинаковым для различных рассеивающих сред.

Эти результаты Раман направил в «Природу» 8 марта в виде письма, опубликованного 21 марта 1928 года. Только об этих двух опытах могли упоминать в своей статье, отправленной 6 мая, Мандельштам и Ландсберг. Но опыты на этом не окончились. От простого рассмотрения спектра рассеянного света Раман и Кришнан перешли к фотографированию.

Можно представить себе, с каким интересом ожидали физики всего мира новых писем из Калькутты. И вот 5 мая вместе с письмом, отправленным из Индии 22 марта под названием «Оптическая аналогия эффекта Комптона», Раман и Кришнан опубликовали замечательно четкую фотографию полученного ими спектра. «Таким образом, — пишут они, — оптическая аналогия эффекта Комптона очевидна, за исключением того, что мы имеем дело с изменением длины волны много большим, чем сдвиг, встречающийся в диапазоне рентгеновских волн». В этом же письме индийские ученые отмечали, что наблюдаемое изменение частоты рассеянного света совпадает с частотами, имеющими место в инфракрасных спектрах тех веществ, рассеяние в которых они изучали, и что этот сдвиг различен для различных веществ.

Как не вспомнить здесь о Колумбе! Он стремился найти морской путь в Индию и, увидев землю, не сомневался в том, что достиг цели. Были ли у него основания усомниться в своей уверенности при виде краснокожих жителей и незнакомой природы Нового Света?

Не так ли Раман и Кришнан, стремясь к обнаружению эффекта Комптона в видимом

свете, решили, что нашли его, обнаружив свет, прошедший сквозь их светофильтры? Усомнились ли они, когда измерения показали неожиданно большое изменение длины волны? Какой вывод они сделали из обнаруженного ими совпадения величины изменения частоты при рассеянии с частотой инфракрасных спектров?

Ответ на эти вопросы содержится в следующем письме Рамана и Кришнана, датированном 15 мая и опубликованном 7 июля 1928 года в том же журнале «Природа». Да, они поняли: это не эффект Комптона. Они открыли новое явление! Новое явление, по существу предсказанное в теоретической работе, выполненной в 1925 году Крамерсом и Гейзенбергом. Изменение частоты рассеянного света обусловлено переходом энергии падающего света в энергию колебаний молекул и обратно. Эти же колебания молекул приводят к излучению и поглощению инфракрасного света. Но если и то и другое связано с одними и теми же колебаниями, не удивительно, что частоты при этом совпадают.

Наш рассказ был бы неполным, если бы мы не сказали несколько слов о выдающемся индийском ученом, которому присуждена Нобелевская премия по физике за открытие комбинационного рассеяния света. Чандрасекхар Венката Раман выполнил первые самостоятельные исследования по оптике и акустике еще в 1906 году, во время учебы в университете в Мадрасе. Начальный период его деятельности несколько напоминает первые шаги великого физика Альберта Эйнштейна.

Окончив учебу, Эйнштейн пять лет служил в патентном бюро. Именно в этот период он выполнил классические исследования по теории броуновского движения, теории световых квантов, статистической теории поглощения и излучения света и создал колоссальное здание специальной теории относительности. Раман тоже был вынужден в течение десяти лет после окончания университета, с 1907 по 1917 год, служить в департаменте финансов в Калькутте и опубликовал за это время около 30 научных работ. Лишь после этого он был приглашен на кафедру Калькуттского университета. С 1921 года Раман начал исследования молекулярного рассеяния света, которые привели его к одному из замечательных открытий XX века.

Ч. В. Раман — прирожденный физик-экспериментатор. Однако он обладал большой эрудицией в сложных вопросах теории и полностью владел математическим аппаратом, что позволяло ему глубоко проникать в сущность исследуемого явления.

Центральной и ведущей темой его научной работы являлась оптика во всех ее аспектах. Но его самой любимой областью была физика кристаллов, особенно изучение алмазов.

В 1921 году Раман приступил к систематическому исследованию рассеяния света в прозрачных средах, первым крупным его шагом было обнаружение опалесценции в образцах чистого кварца и льда. Явление заключается в том, что прозрачные в проходящем свете кристаллы при боковом освещении оказываются мутными. Поразительно, что во льду это явление было более сильным, чем в кварце, несмотря на более высокий показатель преломления последнего. Раман объяснил это большей сжимаемостью льда и указал, что рассеяние обусловлено флуктуациями плотности. Он доказал это, установив увеличение рассеяния при нагревании образца кварца.

В этих работах проявилась общность научных интересов Рамана и Мандельштама, которая привела их почти одновременно к замечательным результатам в одной области.

Впоследствии Раман возвратился к этим исследованиям и с помощью спектроскопа установил, что изменения частоты рассеянного света в чистом льде и в дистиллированной воде одинаковы. Эти изменения частоты обусловлены комбинационным рассеянием, то есть зависят от внутреннего строения молекул воды, а не от состояния, в котором она находится.

Исследуя двойное лучепреломление в кристаллах, Раман связал это явление с оптической анизотропией молекул и ионов, неоднородностью их свойств в различных направлениях. Это позволило на основании оптических характеристик кристалла сделать заключения о его структуре. Раман с успехом исследовал различные магнитооптические свойства кристаллических тел, а также магнитную анизотропию жидкостей.

После появления писем Рамана и Кришнана в майском и июльском номерах журнала «Природа» стало ясно, что одно и то же явление независимо и практически одновременно

открыто и изучается в Москве и Калькутте, но московские физики изучали его в кристаллах кварца, а индийские — в жидкостях.

Замечательное открытие вызвало живой интерес среди ученых всего мира. Оказалось, что к близким результатам в конце апреля 1928 года независимо друг от друга пришли и французские ученые И. Рокар и Ж. Кабан, много занимавшиеся исследованиями рассеяния света.

Через некоторое время ученые вспомнили, что еще в 1923 году А. Смекаль на основе элементарной квантовой механики предсказал возможность появления в спектре рассеянного света новых спектральных линий, обусловленных внутримолекулярными колебаниями.

Вслед за работой Смекаля появились и другие теоретические исследования. В 1925 году Крамере и Гейзенберг провели подробное квантовое рассмотрение вопроса, а в 1926 году Шредингер и в 1927 году Дирак исследовали эту же задачу вполне современными методами.

Так физики-теоретики предсказали и подробно изучили новое явление. Вероятно, это не было известно Раману и Кришнану, Мандельштаму и Ландсбергу. Ведь в их первых статьях нет никаких указаний на связь открытого ими явления с тем, которое было уже предсказано и теоретически изучено.

После открытия комбинационного рассеяния в жидкостях Раман и Кришнам начали наблюдать это же явление в кристаллах. При этом была установлена связь строения кристалла со спектром комбинационного рассеяния, изучена температурная зависимость эффекта и получен ряд других ценных данных.

Важное значение имеет заключение Рамана о независимости нормальных колебаний решетки кристалла от состояния его поверхностей (от граничных условий) и четкое разделение «структурных колебаний» и «упругих колебаний» кристалла.

Особенно подробно Раман исследовал кристаллическую структуру алмаза — вещества, представляющего особый интерес с точки зрения физики. Раман и его сотрудники исследовали алмаз оптическими методами в видимом свете, а также с помощью инфракрасных, ультрафиолетовых и рентгеновских лучей. Изучались характеристики, общие для всех сортов алмазов, и тонкие различия между его разновидностями. Раманом и его школой было подробно исследовано и давно известное, но ранее не изученное явление люминесценции алмаза и обнаружено, что алмаз способен к двум различным типам люминесценции. На кристаллах алмаза проводились исследования термооптических, магнитооптических и других свойств кристаллических тел.

В 1947 году Ч. В. Раман был избран зарубежным членом-корреспондентом АН СССР. Ч. В. Раман был не только крупным ученым, но и выдающимся общественным деятелем. Ему была присуждена Международная Ленинская премия «За укрепление мира между народами» 1956 года. Из школы Ч. В. Рамана вышла блестящая плеяда ученых, среди которых есть и очень крупные специалисты, пользующиеся мировой известностью.

Что же такое комбинационное рассеяние света?

Подробные исследования обнаружили следующие основные черты этого явления. При прохождении пучка монохроматического (одноцветного) света через совершенно чистое, лишенное всяческих загрязнений вещество часть света рассеивается в стороны. Рассеянный свет содержит, кроме света первоначальной частоты, также свет измененных (комбинированных) частот. Разность этих частот и частоты падающего света зависит от свойств рассеивающего вещества и не зависит от частоты падающего света.

В результате на фотографии спектра рассеянного света каждая спектральная линия, излучаемая источником света, сопровождается группой линий измененной частоты — спутниками или сателлитами этой линии. Сателлиты расположены по обе стороны от основной линии, они появляются парами, расположенными симметрично на одинаковых расстояниях от основной линии. Как сказано выше, эти расстояния составляют характерную

особенность рассеивающего вещества и не зависят от частоты основной линии. Число видимых спутников также зависит от свойств рассеивающего вещества. Характерно, что спутники, обладающие меньшей частотой, то есть расположенные с той стороны основной линии, которая ближе к красному участку спектра («красные» спутники), обычно ярче, чем те, которые расположены ближе к фиолетовому участку спектра («фиолетовые» спутники). Обнаружено, что разность частот основной линии и соответствующих спутников, которая является характеристикой рассеивающего вещества, обычно совпадает с частотами линий, наблюдаемых при изучении спектров этого же вещества в инфракрасных лучах.

Линии комбинационного рассеяния являются, таким образом, тем отпечатком, который молекулы рассеивающего вещества накладывают на спектр света источника. Именно это дало право Л. И. Мандельштаму назвать комбинационное рассеяние света языком молекул. Для тех, кто сумеет расшифровать и понять фотографии спектра комбинационного рассеяния, молекулы, пользуясь этим языком, раскроют тайны своего строения.

Для объяснения деталей этого интересного явления необходимо привлечь квантовую теорию и хотя бы бегло проследить путь, пройденный Смеркалем, Гейзенбергом, Шредингером, Дираком и другими физиками-теоретиками.

Основой квантовой теории является положение о том, что энергия, в любом ее виде, может передаваться только вполне определенными порциями. В каждой системе микромира — атоме, молекуле и т. п. — существует минимальная порция энергии. Меньшая порция энергии уже не может передаваться. Квантовая теория света, созданная А. Эйнштейном, заключается в том, что обмен энергией между частицами вещества и светом происходит путем уничтожения одних и рождения других квантов света (фотонов). Количество энергии, заключающейся в каждом из них, зависит от частоты света, то есть от его цвета.

При обычном рассеянии, рассмотренном еще Релеем, когда частота света не изменяется, энергия каждого из рассеянных фотонов совпадает с энергией падающих. При комбинационном рассеянии частота рассеянного света отличается от частоты падающего. Следовательно, энергия рассеянных фотонов отличается от энергии падающих. За счет чего же возникает это различие в энергии падающих и рассеянных фотонов? Теория отвечает на этот вопрос так: атомы, образующие молекулы, совершают периодические колебания. Если свет взаимодействует с колеблющимся атомом, то энергия фотона, рассеянного при взаимодействии (для простоты и наглядности можно образно называть процесс его взаимодействия с атомом столкновением) с колеблющимся атомом, может отличаться от энергии падающего фотона. Если часть энергии падающего фотона будет затрачена на увеличение колебаний атома, то энергия рассеянного фотона окажется меньшей, чем энергия падающего. Если же часть энергии атома перейдет к свету, энергия рассеянного фотона увеличится. Теория говорит, что первый процесс происходит при обычных температурах чаще, чем второй. Поэтому при обычных температурах «красные» спутники, соответствующие уменьшению энергии рассеянного света по сравнению с падающим, оказываются более яркими, чем «фиолетовые» спутники, соответствующие увеличению энергии фотонов в результате процесса рассеяния.

По мере повышения температуры вещества рассеяние с возрастанием энергии происходит все более часто. Поэтому с ростом температуры яркость «фиолетовых» спутников приближается к яркости «красных» спутников.

Как мы уже говорили, переходы энергии могут осуществляться только вполне определенными характерными для данного вещества порциями, следовательно, разности энергий между рассеянными и падающими фотонами тоже могут быть только вполне определенными. А так как разность энергий фотонов определяет разность частот спектральных линий, то это объясняет, почему расстояния между линиями комбинационного рассеяния и основными линиями падающего света имеют вполне определенную величину, характерную для рассеивающего вещества. Можно понять механизм комбинационного рассеяния света и не прибегая к квантовой теории. Действительно, основные черты его хорошо описываются обычной электромагнитной теорией. Чтобы наглядно представить себе

этот процесс, удобно сравнить его с процессами, происходящими при передаче и приеме сигналов по радио.

Мы уже говорили о том, что ртутная лампа испускает свет, состоящий из ряда линий, имеющих вполне определенную частоту. Это значит, что, пройдя через призму, свет такой лампы не образует непрерывной радужной полосы, подобной той, которую образует при прохождении через призму белый цвет (свет Солнца, вольтовой дуги, электрической лампы накаливания и т. п.). Призма преобразует свет ртутной лампы не в сплошную радужную полосу, а в ряд отдельных разноцветных линий, расположенных в порядке следования радужных цветов на различных расстояниях одна от другой. Таким образом получается спектр паров ртути.

Аналогией этому явлению в области радио может служить любой радиопередающий центр. В нем одновременно работают несколько радиопередатчиков, каждый на одной вполне определенной частоте. Если вращать ручку настройки приемника, то каждая станция будет слышна только при одном определенном положении указателя на шкале приемника. Отметив эти положения, мы получим спектр частот, излучаемых данным радиопередающим центром.

Если радиостанции включены, но на микрофон не попадает никаких звуков, то в приемнике, настроенном на любую из этих станций, тоже не будет слышно никаких звуков. В этом случае с помощью индикатора настройки мы сможем только определить, что станции включены и работают.

Если на микрофон, соединенный одновременно со всеми радиостанциями, попадают какие-либо звуки, то эти звуки будут одновременно слышны в приемниках, настроенных на любую из этих радиостанций. Обычные радиоприемники при этом будут принимать звуковую программу. В приемнике будут появляться различные по высоте тона и по силе звуки, совершенно похожие на те, которые падают на микрофон.

Если же мы сконструируем радиоприемники со слишком острым резонансом, то уже не сможем получить с их помощью обычного радиоприема. Они не смогут воспроизвести звуки, совпадающие с теми, которые воздействуют на микрофоны передатчиков. Вместо этого такие приемники с чрезмерно острым резонансом обнаружат присутствие новых «действующих радиостанций» вблизи тех мест шкалы, на которых обычные приемники принимают радиостанции нашего радиопередающего центра. Появление этих новых частот в спектре радиопередающего центра есть результат восприятия нашими весьма резонансными приемниками передачи, модулированной звуковой программой. Это аналогично комбинационному рассеянию. В результате модуляции в спектре возникли новые линии.

Из примера с модуляцией силы звука камертона можно понять, что рассмотренное различие в радиоприеме является следствием конструктивных особенностей приемников. В опыте с камертонами наше ухо воспринимало только изменения силы звука. В отличие от уха, камертоны, настроенные на соседние близкие частоты, легко обнаружили их реальное присутствие. Это объясняется тем, что камертоны обладают очень острым резонансом. Они легко различают частоты, отличающиеся между собой всего на несколько периодов. Но при этом величина колебаний ножек камертонов остается постоянной. Это значит, что камертоны не воспринимают модуляцию как изменение силы звука. Они воспринимают ее только как появление новых тонов постоянной силы, которые отсутствовали в звуке, испускаемом немодулированным источником.

Вернемся снова к примеру с радиоцентром. Количество и сила новых (так называемых боковых) частот, а также их расположение будут одинаковыми для всех передатчиков нашего радиоцентра и зависят только от характера модулирующих звуков. Если передатчики модулируются чистым звуком одной определенной частоты (например, звуком струны или свистка), то рядом с частотой каждого передатчика возникнут по две новых боковых частоты, симметрично расположенных вокруг несущей. Расстояние между боковой частотой и несущей в точности равно частоте модулирующего звука и не зависит от того, какова частота радиостанции.

При наблюдении рассеянного света дело обстоит совершенно так же. В спектре ртутной лампы можно обнаружить ряд отдельных спектральных линий. Эти линии аналогичны отдельным радиостанциям передающего центра в нашем примере. Каждой спектральной линии, как и каждой радиостанции, соответствует своя частота колебаний. При прохождении света через вещество он рассеивается в стороны, но простые спектральные аппараты не обнаруживают появления при этом новых боковых частот, вызванных колебательными движениями атомов в молекулах. Так как атомы, образующие молекулы, колеблются с гораздо меньшими частотами, чем те, которые соответствуют видимому свету, то боковые частоты очень близки к основным частотам источника света. Вместе с тем эти частоты все же настолько велики, что наш глаз не в состоянии воспринять модуляцию как периодическое изменение силы света. Глаз не успевает следить за столь быстрыми изменениями, и мы ощущаем некоторую среднюю силу света.

Но «достаточно резонансные» оптические приборы, то есть достаточно хорошие спектроскопы или специальные резонансные фильтры, как, например, сосуд с парами ртути, примененный московскими физиками, могут отделить основные линии ртутной лампы от боковых линий, появляющихся в результате комбинационного рассеяния. Сейчас мы знаем, что простые светофильтры, примененные в первой работе Рамана и Кришнана, не могли отделить линии комбинационного рассеяния от света основной линии.

Отдельные линии оптического спектра источника можно уподобить отдельным радиостанциям радиопередающего центра. Линии комбинационного рассеяния, то есть боковые линии, появляются вокруг каждой основной линии, так как все основные линии одновременно модулируются совокупным действием колебательных движений атомов, образующих молекулы рассеивающего вещества.

Итак, в 1928 году было открыто и объяснено замечательное явление комбинационного рассеяния света. Однако как же обстоит дело с теми малыми изменениями, которые искали в 1928 году и не сумели обнаружить Мандельштам и Ландсберг? Правильна ли теория 1918 года?

Окончательный ответ на этот вопрос был дан впоследствии как работами Ландсберга и Мандельштама, впервые обнаружившими такое рассеяние в 1930 году, так и главным образом прекрасными опытами советского ученого Е. Ф. Гросса. По предложению Мандельштама и Ландсберга в Государственном оптическом институте в Ленинграде им были поставлены тщательные опыты, которые привели к точному подтверждению теории Мандельштама. Гросс обнаружил это явление не только в твердых телах, но и в жидкостях, что дало в руки ученых еще одно средство для изучения сложного и интересного вопроса о строении жидкостей. Опыты Гросса вызвали дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования. Советский физик Л. Д. Ландау совместно с чешским физиком Г. Плачком показали, что наряду с флуктуациями плотности следует учитывать флуктуации температуры. В то время как первые рассасываются путем распространения упругих волн, вторые выравниваются вследствие теплопроводности.

Из лаборатории в промышленность

Исследования комбинационного рассеяния света не только создали новую главу в науке, но и дали важное оружие промышленности. Достаточно сказать, что за полвека, прошедших после открытия комбинационного рассеяния, опубликовано несколько тысяч научных работ в этой области. Значительное число этих работ принадлежит советским физикам, ученикам и сотрудникам академиков Мандельштама и Ландсберга, и индийским ученым школы Рамана.

Результаты этих работ сделали комбинационное рассеяние одним из наиболее мощных способов изучения свойств вещества. Физики пользуются этим методом для изучения природы и строения жидкостей, исследования кристаллов и стекловидных веществ. Химики используют его для изучения структуры химических соединений, природы сил, приводящих

к объединению атомов в молекулы. Органическая химия приобрела в комбинационном рассеянии наиболее удобный метод изучения строения сложных органических соединений.

Сотрудники лаборатории Физического института имени П. Н. Лебедева Академии наук СССР, которой руководил академик Ландсберг, разработали методы исследования вещества, использующие явление комбинационного рассеяния света. Они позволяют в условиях заводской лаборатории быстро и точно производить количественные и качественные анализы авиационных бензинов, других продуктов переработки нефти и синтетических органических жидкостей.

Для того чтобы стали понятны огромные трудности, которые пришлось преодолеть советским ученым при изучении комбинационного рассеяния света, достаточно привести следующие цифры. Из общего количества световой энергии, поступающей в изучаемое вещество, в спектральный аппарат попадает примерно одна десятиллиардная часть. Но на долю линий комбинационного рассеяния редко приходится 2–3 % этой величины. Обычно эти линии еще более слабы, поэтому явление комбинационного рассеяния так долго оставалось незамеченным. Понадобилось огромное экспериментальное искусство, чтобы обнаружить это явление, и глубокое понимание физической природы взаимодействия между светом и веществом для того, чтобы его понять и не приписать появление неизвестных линий случайной ошибке.

При получении первых фотографий комбинационного рассеяния требовалась экспозиция в десятки часов. Аппаратура, созданная советскими учеными, позволяет теперь получить спектр чистых веществ в течение нескольких минут, а иногда и секунд. Даже для анализа сложных смесей, в которые отдельные вещества входят в количестве всего нескольких процентов, обычно достаточны экспозиции, не превышающие одного часа.

Итак, открытие и исследование комбинационного рассеяния света позволило ученым «бросить взгляд внутрь молекулы». Обычно спектральные линии, испускаемые газами при пропускании электрических искр или под влиянием высокой температуры, говорят о строении электронных оболочек атомов этих газов. Линии комбинационного рассеяния говорят о строении молекул, о силах, связывающих отдельные атомы в молекулы, об относительных движениях атомов, образующих молекулу. При расшифровке линий комбинационного рассеяния физики учились понимать своеобразный световой язык, которым молекулы рассказывают нам о своих тайнах.

Впервые этот язык, записанный на фотопластинках, проявленных в оптической лаборатории, был открыт, расшифрован и понят Мандельштамом и Ландсбергом, Раманом и Кришнаном. Они научили своих учеников разбирать этот язык. В течение полувека во всем мире ведется упорная работа по составлению словаря языка молекул, словаря, который оптики называют каталогом спектральных линий комбинационного рассеяния. Когда такой каталог будет составлен, процесс расшифровки спектрограмм значительно облегчится и не будет требовать той большой и трудоемкой работы, которая проводится сейчас при исследовании сложных веществ.

Новая жизнь

Крупное открытие, сделанное в одной из областей науки, неизбежно проявляется и в других областях, иногда кажущихся очень отдаленными. Обычно открытие оказывает воздействие и на технику, а через нее и на повседневную жизнь человечества. К таким крупным научным событиям принадлежит создание лазеров. Квантовая электроника родилась вместе с изобретением молекулярного генератора радиоволн, но ее расцвет начался после создания лазеров и освоения ею оптического диапазона. До появления лазеров наблюдение комбинационного рассеяния света требовало многочасовых экспозиций, что затрудняло применение этого метода в промышленности (впрочем, несмотря на трудности, этот метод и ранее применяли для контроля на некоторых химических предприятиях). Огромная, яркость излучения лазеров кардинально изменила ситуацию. Применение

фотографической регистрации стало необязательным. Спектры комбинационного рассеяния теперь можно наблюдать непосредственно глазами. Более того, их удобно фиксировать фотоприемниками и включать эти фотоприемники в системы автоматического управления технологическими процессами. Хорошо разработанные методы наблюдения комбинационного рассеяния открыли один из путей применения лазеров в промышленности.

Создание лазеров привело к рождению новой области науки — нелинейной оптики, имеющей непосредственное отношение к проблеме рассеяния света. Нелинейная оптика пережила долгий период утробного развития. Еще в 1923 году С. И. Вавилов и В. Л. Левшин обнаружили уменьшение доли поглощенного света при увеличении интенсивности падающего света. До того никто не сомневался в независимости всех оптических явлений от интенсивности света. Но С. И. Вавилов сделал из своего частного наблюдения далеко идущие выводы. Он понял, что оптические явления не зависят от интенсивности света только тогда, когда эта интенсивность мала. Он знал, что такая ситуация встречается и в других областях науки, например в такой древней, как механика.

Даже открытое Галилеем постоянство периода колебаний маятника справедливо, только если размахи маятника малы. Стоит отклонить или толкнуть маятник сильнее, период его колебаний изменится. Это лишь простой пример. Аналогичные ситуации встречаются повсеместно.

Во всех случаях, когда главные особенности явлений не зависят от масштаба характеризующих их величин, исследования приводят к простейшим математическим уравнениям. Математики называют такие уравнения линейными потому, что одно из них описывает свойства прямой линии.

Когда закономерности какого-либо явления зависят от интенсивности (от величины) соответствующих процессов, для их изучения требуется применение более сложных — нелинейных уравнений. Поэтому, поняв, что при увеличении интенсивности света должны наблюдаться новые неведомые явления, зависящие от интенсивности света, Вавилов ввел новый термин. Он назвал нелинейной оптикой новый раздел оптики, открывшей ему свое присутствие слабой зависимостью величины поглощения света стеклом, содержащим соединения урана.

Следующий шаг в неведомую область сделал лишь через 30 лет Г. С. Горелик. Он теоретически доказал, что хорошие фотоэлектрические приемники света обладают достаточной чувствительностью, чтобы зарегистрировать нелинейные зависимости в целом ряде оптических явлений. Одно из таких явлений обнаружили в 1955 году американские исследователи.

Первые лазеры заработали в 1960 году. О лазерах мы поговорим позже. Сейчас большинство людей знает, что лазеры — новые источники света, испускающие свет несравненно более яркий, чем все другие известные источники света. Уже в 1961 году П. Франкен зафиксировал первый нелинейный лазерный эффект — удвоение частоты света, проходящего через прозрачный кристалл, а еще через год Е. Вудберн и В. Нг обнаружили вынужденное комбинационное рассеяние света.

Еще одна сказка

Каждый помнит восточного мудреца, попросившего о скромном вознаграждении. Он хотел, чтобы на первую клетку шахматной доски ему положили всего одно зернышко, а на вторую только два, на третью лишь четыре, и так, не запрашивая большего, он просил, чтобы на каждую следующую клетку ему клали всего вдвое больше зерен, чем на предыдущую. И каждый помнит, к чему это должно было привести. Скромное удвоение приводит к фантастически быстрому росту. Уже на восьмой клетке придется размещать 128 зерен...

Ученики и последователи Мандельштама и Ландсберга сумели извлечь пользу из ничтожных количеств света, преобразующегося в спектральные линии комбинационного рассеяния. Уже первые лазеры превратили наблюдение комбинационного рассеяния из

изошренного эксперимента рутинную операцию. Но доля световой энергии, преобразующейся в излучение комбинационных частот, оставалась ничтожной. Однако ничтожная часть очень большой величины может оказаться достаточно крупной. Миллионная доля от миллиона тонн — это целая тонна!

Бурный рост лазеров привел физиков в область нелинейной оптики, путь в которую был указан Вавиловым. То, с чем им пришлось встретиться, ошеломляло не меньше, чем увеличение количества зерен в древней сказке.

Весь прежний опыт говорил о том, что по мере погружения луча света в рассеивающую среду интенсивность рассеянного света быстро уменьшается, даже если среда прозрачна и не поглощает свет. Никого это не удивляло. Ведь при рассеянии интенсивность первоначального света уменьшается за счет того, что часть энергии света рассеивается в стороны; уменьшается очень быстро, быстрее, чем увеличиваются кучки зерен на шахматной доске.

Но с лазерным лучом все выглядит сложнее. Конечно, и лазерный луч ослабевает по мере погружения в рассеивающую среду. Более того, его интенсивность убывает быстрее, чем убывала интенсивность в опытах с обычными источниками света. Удивительным оказалось, что интенсивность рассеянного света на начальном участке, там, где лазерный луч входит в рассеивающую среду, не убывает, а быстро возрастает. Такое может быть, только если доля рассеянного света не остается постоянной, а возрастает по мере продвижения лазерного излучения в среду.

Приходится признать, что процесс рассеяния отсасывает энергию из лазерного пучка сильнее, чем из пучка света обычного источника, причем по законам, неведомым оптикам. Это законы нелинейной оптики.

Теперь, когда они изучены, они выглядят необыкновенно ясными. Впрочем, и в то время их удавалось уяснить сравнительно легко при помощи общей теории нелинейных процессов, которая к тому времени уже была хорошо разработана усилиями Мандельштама и Н. Д. Папалекси, Ю. Б. Кобзарева, Н. Н. Боголюбова и их учеников.

К школе Мандельштама и Папалекси принадлежал Рем Викторович Хохлов (молодой ректор МГУ, трагически погибший в альпинистском походе в 70-х годах). Он внес решающий вклад в становление нелинейной оптики, раздела оптики, имеющего дело с оптическими явлениями при высокой интенсивности оптического излучения.

Механизм нелинейного комбинационного рассеяния лишь немногим сложнее обычного. При обычном комбинационном рассеянии часть падающего света рассеивается в стороны атомами вещества и изменяет при этом частоту в соответствии с частотами колебаний атомов в молекулах рассеивающего вещества. Интенсивность света, рассеиваемого в процессе обычного комбинационного рассеяния, пропорциональна интенсивности падающего света и увеличивается вместе с интенсивностью колебаний молекул. При обычном комбинационном рассеянии колебания молекул остаются практически неизменными при их взаимодействии со светом.

Но при воздействии на вещество мощного излучения лазера ситуация изменяется. Этого нельзя было предвидеть исходя из многовекового опыта обычной линейной оптики. Конечно, явления, известные ранее, не исчезли. Лазерное излучение, взаимодействуя с атомами, точнее, с электронами атомов, входящих в молекулы вещества, рассеивается в стороны. При этом в рассеянном излучении содержатся не только частоты первоначального лазерного излучения, но и комбинационные частоты. Словом, при применении лазерного источника сохраняются все особенности рассеянного света, изученные Мандельштамом и Ландсбергом, Раманом и Кришнаном.

Новой является только большая интенсивность рассеянного света. Но в этом нет ничего неожиданного, это предвидел Вавилов, изучением этого занимался Хохлов. Ведь интенсивность излучения лазера очень велика, а интенсивность рассеянного излучения пропорциональна интенсивности падающего излучения. Коэффициентом пропорциональности при этом служит интенсивность внутримолекулярных колебаний.

Неожиданным является то, что излучение, возникшее в процессе рассеяния, если оно достаточно интенсивно, способно в свою очередь увеличивать внутримолекулярные колебания. Сказанное нуждается в уточнении: рассеянное излучение может влиять на колебания молекул, только если оно действует совместно с породившим его излучением лазера. Это значит, что рассеянное излучение влияет только на колебания тех молекул, которые располагаются в пределах пучка лазерного излучения.

При этом излучение лазера, рассеянное атомами, входящими в молекулы, действуя на эти же атомы совместно с первоначальным лазерным излучением, раскачивает их.

Здесь начинается самое интересное: переход от линейной оптики к нелинейной. Линейная оптика говорит, что интенсивность колебаний атомов в молекулах вещества служит постоянным множителем пропорциональности между падающим и рассеянным излучением. Нелинейная оптика замечает: это справедливо только при малых мощностях. При больших мощностях постоянный множитель пропорциональности превращается в переменную величину, зависящую от мощности падающего и рассеянного излучения. Причем этот ранее постоянный множитель растет вместе с мощностью излучения. Так замыкается цепочка. Увеличение мощности рассеянного излучения приводит к дальнейшему увеличению рассеяния. Именно эта особенность отражена в названии «вынужденное рассеяние». Рассеяние мощного лазерного излучения, воздействуя на вещество, создает условия для возникновения все более мощного рассеяния. Пропорциональность, то есть простая линейная зависимость мощности рассеиваемого излучения от мощности падающего излучения, заменяется более сложной нелинейной зависимостью.

Самовоздействие

При взгляде со стороны на луч достаточно мощного лазера, проникающий в прозрачное вещество, видно, что яркость рассеянного излучения возрастает по мере его углубления в вещество. Конечно, такое возрастание не безгранично. Ведь энергия лазерного излучения постепенно расходуется, порождая рассеянное излучение. Поэтому процесс постепенно становится все менее и менее эффективным. Физики говорят — процесс идет с насыщением. Возрастание интенсивности рассеиваемого излучения постепенно замедляется, а затем уступает место ослаблению, по мере того как все более расходуется энергия излучения, исходящего из лазера.

Основываясь на нелинейной оптике, физики использовали вынужденные рассеяния для создания новых оптических приборов, открывших удивительные возможности.

Один из таких приборов назван ВКР-лазером, т. лазером на вынужденном комбинационном рассеянии. Для создания такого лазера оказалось достаточным поместить прозрачную жидкость, газ или твердое тело внутрь оптического резонатора и облучить его достаточно мощным лазером. Резонатор должен быть настроен на частоту одной из компонент комбинационного рассеяния, определяемой разностью частоты, излучаемой лазером, и одной из частот колебаний молекул выбранного прозрачного вещества. Рассеянное излучение, многократно отражаясь от зеркал резонатора, каждый раз способствует увеличению интенсивности рассеяния именно этого же излучения. В результате мощность рассеянного таким образом излучения лавинообразно возрастает, как возрастает мощность излучения обычного лазера, когда в нем начинается процесс генерации излучения. Возникающее вынужденное комбинационное излучение обладает всеми характерными признаками лазерного излучения, его узкой направленностью, его высокой когерентностью, то есть способностью к образованию четких интерференционных полос. Таким образом ВКР-лазеры способны создавать излучение, не отличающееся от излучения обычных лазеров, причем создавать его и на тех частотах, для которых не существует обычных лазеров.

Самовоздействие рассеянного излучения возникает не только в процессе комбинационного рассеяния, но и при рассеянии других типов, например при рассеянии,

предсказанном Мандельштамом в 1918 году, а затем независимо изученном Л. Бриллюэном. Это вынужденное рассеяние возникает только при больших лазерных мощностях падающего излучения и не может быть получено при помощи нелазерных источников. Его называют вынужденным излучением Мандельштама — Бриллюэна.

Как и обычное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна, оно вызвано хаотическими (тепловыми) процессами в прозрачных веществах. Здесь имеются в виду хаотические движения, в которых каждая молекула участвует как целое. Конечно, и в этом случае свет взаимодействует непосредственно с электронами, входящими в атомы, а атомы (или ионы) входят в состав молекул и колеблются относительно центров масс соответствующих молекул. Эти колебания, как известно, проявляются в процессах Комбинационного рассеяния (свободного и вынужденного).

В рассеянии Мандельштама — Бриллюэна существенны те движения, в которых молекула участвует как единое целое, это движения ее центра масс. Они проявляются в форме местных изменений плотности при случайных возникновениях небольших сжатий и разрежений. Такие сжатия и разрежения могут быть следствием звуковых, сверхзвуковых или даже гиперзвуковых волн, движущихся внутри вещества. Если даже не возбуждать каким-либо регулярным образом звуковые (гиперзвуковые) волны, то тем не менее в веществе постоянно возникают и исчезают случайные флуктуационные волны, проявляющие свое присутствие только в форме местных изменений плотности вещества.

Наряду с такими флуктуациями плотности внутри вещества всегда существуют флуктуации температуры, флуктуации теплоемкости и других величин, средние значения которых характеризуют внутреннее состояние вещества.

Рассеяние, возникающее при больших мощностях лазерного излучения, повышает интенсивность хаотических процессов в веществе, интенсивность флуктуации всех этих величин, что в свою очередь увеличивает рассеяние излучения. При этом тоже возникает самовоздействие, в результате чего любое увеличение рассеяния приводит к его дальнейшему возрастанию.

Отличается ли вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна от вынужденного комбинационного рассеяния?

Да, отличается. Попробуем найти физическую причину наблюдаемого различия. Величина молекул много меньше длины световой волны. Поэтому на расстояниях, соизмеримых с длиной волны, излучение взаимодействует со множеством атомов, входящих в молекулы, находящиеся в различных состояниях внутренних колебаний. В отличие от этого, масштабы тепловых флуктуаций, в которых молекулы участвуют как целое, много больше размеров молекул, а их возникновение и рассасывание происходит более медленно. При этом внутримолекулярные колебания не проявляют свои особенности, а возникающие более плавные неоднородности лишь незначительно влияют на длину волны рассеянного излучения. При лазерных мощностях и обратное влияние — самовоздействие — имеет соответственно плавную пространственную структуру. Такое самовоздействие возникает вследствие совместного влияния на вещество двух световых полей, обладающих малым различием длин волн.

Легко представить, что происходит, если рассеяние такого типа претерпевает плоская световая волна, то есть волна, гребни и впадины которой образуют в пространстве систему параллельных поверхностей. При этом рассеиваемые волны тоже имеют структуру множества параллельных плоскостей. Но так как скорости распространения рассеянных волн вследствие различия длин этих волн различны, то первичные волны обгоняют рассеянные волны или отстают от них. В результате сложения с рассеянными волнами первичные волны частично отражаются и поворачивают обратно к возбудившему их источнику. Рассеяние такого типа называют обратным рассеянием. По мере увеличения мощности падающего лазерного излучения вынужденное рассеяние назад становится преобладающим. Волны, возбуждаемые лазером, проникают в вещество лишь на небольшую глубину, а затем поворачивают обратно и выходят из вещества так, как если бы они встретили на пути

зеркало.

Навстречу времени

Практическое применение этого явления открывает поистине потрясающие возможности. Наиболее четко они могут быть выражены фразой: вынужденное рассеяние назад позволяет обратить для световой волны направление течения времени. Фразой, кажущейся безумной каждому, знающему, что время неотвратно течет только в одном направлении: от прошлого к будущему.

Один из первооткрывателей нового явления Б. Я. Зельдович, сын академика Я. Б. Зельдовича, с которым мы еще встретимся неоднократно, и его сотрудники приводят в качестве примера такую картину. На вышке для прыжков в воду стоит девушка. Прыжок, и она касается руками гладкой поверхности воды. На поверхности воды возникают кольцевые волны, разбегающиеся в стороны, небольшое количество брызг взлетает вверх и падает вслед за тем, как тело девушки уходит под воду; волны постепенно успокаиваются, а девушка выплывает где-то вдали, чтобы не отвлекать нашего внимания. Кинооператор фиксирует все это на пленку.

Проявив пленку, оператор может воспроизвести описанную картину на экране. Если он захочет посмотреть ее еще раз, ему необходимо перемотать пленку в обратном направлении. Перематывая ее при помощи кинопроекторного аппарата, он увидит, как на гладкой поверхности воды возникают кольцевые волны, сбегающие к центру. Вдруг из центра возникают ноги девушки. Капли, поднимающиеся со всех сторон, слетаются к центру. Тело девушки постепенно поднимается над водой. Когда она снова окажется в воздухе, поверхность воды станет зеркально гладкой — все волны и капли исчезнут там, где девушка последний раз соприкасалась с водой. Затем девушка взмоет на вышку и улыбнется точно так же, как она улыбалась перед прыжком.

Такое возможно только в кино. В реальном мире время неуклонно течет от прошлого к будущему. Обратить течение времени невозможно.

Но в некоторых физических опытах можно наблюдать явления, которые в существенной мере приближаются к тому, что было при «обращении времени» при помощи кинофильма.

Простейший пример — хороший мяч, падающий на твердый пол. Еще лучше — стальной шарик, падающий на стальную плиту. Глядя на подскакивающий шарик, мы видим то же самое, что увидели бы, обратив вспять кинопленку, зафиксировавшую его падение. Конечно, шарик не достигнет исходной высоты. Причина ясна: трение о воздух, затрата энергии на возбуждение звуковых волн внутри шарика и плиты, а также в воздухе. Но Галилей научил нас, обдумывая опыты, отделять главное от второстепенного. Второстепенное здесь — потеря энергии. Главное — обратимость механических движений, выражающаяся в том, что время входит в уравнения механики обратимо. Изучая механику, можно изменять знак, стоящий в уравнениях перед временем.

Рассматривая процесс в целом, необходимо определить, когда отброшенные «мелочи» станут существенными, а математическая модель (уравнения) должна быть уточнена. Уточнение покажет, когда обращение времени становится не соответствующим реальности. Ответ прост. Нельзя аналогично толковать опыт с шариком в тех случаях, когда потери механической энергии слишком велики и каждый последующий подскок шарика много меньше предыдущего. В этом случае требуется учет трения, приводящего к выделению тепла, а значит, для описания опыта потребуются привлечение термодинамики.

Совершенно так же обстоит дело в оптике. Оказывается, что в оптике существуют явления, развивающиеся так, будто в течение коротких интервалов времени направление событий во времени может быть изменено на обратное.

Симметрия уравнений оптики (так же, как уравнений механики) такова, что обращение времени может быть заменено обращением направлений, то есть заменой реальных

движении движениями, направленными противоположно.

В оптике для этого следует заменить направление распространения световых волн (вперед и назад, от центра к центру). Такую замену называют обращением волнового фронта, а если такое обращение возникает как следствие самовоздействия, например при вынужденном рассеянии, его называют самообращением волнового фронта. Теперь эффект самообращения может быть получен при различных вынужденных рассеяниях. Установлено, что эффект самообращения очень близок к тому, что происходит при голографии и в некоторых других случаях.

При вынужденном рассеянии Мандельштама — Бриллюэна удастся добиться практически полного обращения волнового фронта. Вот несколько примеров того, что может быть при этом достигнуто.

Известно, что получение в твердотельных лазерах столь узких пучков излучения, как в лучших газовых лазерах, связано с огромными трудностями и большими затратами. Причина в сложности изготовления достаточно однородных лазерных кристаллов. Существенно, что количество и степень неоднородности возрастают при увеличении размеров кристалла. Поэтому попытки использовать большой лазерный усилитель для усиления излучения, получаемого от хорошего малоомощного лазера, не приводят к успеху — неоднородности усилителя портят качество усиливаемого излучения. Попытки применить еще один усилитель или вторично применить первый лазерный усилитель приведут лишь к дополнительному ухудшению качества излучения.

Но если излучение, искаженное лазерным усилителем, подвергнуть обращению волнового фронта, оно вторично пройдет тот же лазерный усилитель в обратном направлении, причем все искажения, возникшие при первом проходе окажутся скомпенсированы при обратном проходе. С ним произойдет то же, что с девушкой на киноплёнке. Двукратное прохождение в прямом и обратном направлении приведет все в исходное состояние. В случае с лазерным усилителем обращение волнового фронта и двукратное прохождение через усилитель приведет к увеличению интенсивности излучения без внесения в него искажений. Так, в рубиновом лазере плохого качества удалось полностью сохранить однородность усиливаемого излучения при увеличении его интенсивности в 400 раз. Это достигается потому, что каждый из участков световой волны, прошедший определенный путь внутри лазера-усилителя, проходит в обратном направлении в точности тот же путь. При этом все искажения, приобретаемые по пути вперед, выправляются во время пути обратно. Волна, прошедшая усилитель дважды в противоположных направлениях, отличается от волны, входящей в усилитель, только тем, что она усилена и идет в противоположном направлении.

При этом существенно, что скорость света так велика, что за время его двойного прохождения состояние усилителя практически неизменно. (Вспомним, что обращение времени может быть заменено обращением направлений, только если в условиях опыта не происходят изменения оптических свойств среды.)

Вслед за Н. Г. Басовым и его сотрудниками лазерные усилители с обращением волнового фронта на вынужденном рассеянии успешно применяют для лазерного нагрева малых мишеней при термоядерных и других исследованиях. Аналогичным способом возможно самонаведение излучения лазеров через неоднородные среды, например через атмосферу, или при применении дешевых оптических деталей сравнительно низкого качества. Этой возможностью предполагают воспользоваться создатели наземного лазерного оружия, предназначенного для поражения целей в космосе в ходе звездных войн.

Нелинейная оптика, ведущая свою родословную от Вавилова, нашла пути преобразования длины волны (цвета) лазерного излучения. Стало возможным создавать приборы, порождающие из невидимого инфракрасного излучения яркий зеленый свет или любой другой из цветов, входящих в спектр излучения Солнца и даже в невидимое ультрафиолетовое и в мягкое рентгеновское излучение.

Нелинейная оптика позволила разработать сверхчувствительные приемники света,

аналогичные лучшим радиоприемникам, и реализовать стабильность частоты источников света, превосходящую стабильность лучших атомных часов.

Однако это выходит за пределы, очерченные рамками главы, охватывающей лишь то, что связано с рассеянием света. Об этом будет рассказано в другом месте.

ГЛАВА 3

ОБГОНЯЯ СВЕТ

Нужны исключительные обстоятельства, чтобы имя ученого попало из науки в историю человечества.

О. Бальзак

Увидеть невидимое!

В абсолютной темноте работали дни за днями молодые энтузиасты, изучавшие в начале тридцатых годов природу света.

Изучать свет в темноте! Что может быть нелепее этого! Но тем не менее в здании Академии наук на набережной Невы ученые ежедневно входили в совершенно затемненные комнаты и подолгу сидели в них, обдумывая предстоящие опыты. Да, они сидели в абсолютной темноте и ничего не делали.

Готовились. Подготавливали свои глаза. Лишь через час ошупью подходили к заранее отрегулированным приборам и приступали к работе.

Опыт начинался. Они смотрели и видели то, что совершенно невидимо для остальных людей. Видели свечение столь слабое, что его не мог воспринять ни один из приборов, существовавших в то время.

Это были сотрудники и ученики Сергея Ивановича Вавилова, доказавшего, что человеческий глаз после часового пребывания в темноте способен видеть мельчайшие порции света, измеряемые всего десятками световых квантов-фотонов.

Советские оптики настойчиво изучали люминесценцию — странную способность некоторых веществ самопроизвольно излучать слабый таинственный свет.

Такое самосвечение наблюдают не только ученые. Помните светлячков, то вспыхивающих, то исчезающих в ночной листве? А тому, кто бывал летней ночью на южном море, не забыть серебристой вуали, окутывающей тело пловца, подводную часть лодки, превращающей в фейерверк взбитые веслом каскады брызг.

Светящиеся в темноте стрелки и цифры часов, авиационных приборов... Портреты и пейзажи, писанные светящимися красками... Почему все это светится? Какая невидимая рука поджигает вещество изнутри?

Эту-то загадку и разгадывал Вавилов и его ученики.

...Молодые люди, впервые приходящие сегодня на лекции академика Павла Алексеевича Черенкова, обычно не знают, что курс экспериментальной физики им будет читать ученый, открывший эффект Черенкова. Ведь для молодежи эффект Черенкова так же стар, как и эффект Доплера и другие явления, волнующие воображение многих поколений студентов.

Но вот звонок, и в аудиторию входит спортивного вида человек. Лекция его увлекает так, как может захватить лишь рассказ активного участника интересных событий...

В 1932 году, в то время, когда начинающий физик Павел Черенков изучал свечение растворов ураниловых солей под влиянием гамма-лучей радия, большинство особенностей явления люминесценции оставалось непонятным. Всякое оригинальное наблюдение имело здесь цену. Но особенно важным было выявление новых, неизвестных ранее закономерностей.

Приходя утром в лабораторию и подготавливая глаза, Черенков обдумывал очередной

опыт.

Как изменится свечение знакомого раствора, если увеличить его концентрацию? Что будет, если разбавить раствор водой? Конечно, яркость свечения должна измениться. Но важен точный закон. Необходимо установить зависимость яркости свечения от концентрации светящегося вещества, подвергающегося воздействию радия.

Эксперимент начинается.

По мере ослабления свечения приходилось принимать дополнительные меры, для того чтобы опыт оставался безупречным. Ведь под действием радиоактивного излучения могли светиться и стенки сосуда, в котором налит раствор. Но просто вылить раствор и изучать свечение стенок пустого сосуда нельзя. Условия при переходе света из стекла в воздух резко отличаются от условий его перехода из стекла в раствор.

Решение принято. Нужно заменить раствор чистой водой. По всем оптическим свойствам, кроме, конечно, способности к люминесценции, вода очень мало отличается от слабого раствора.

Опыт поставлен. В сосуде дистиллированная вода. Но, оказывается, свечение наблюдается и в этом случае!

Что это, недостаток методики или результат переутомления глаз? А может быть, дистиллированная вода, которой он пользовался, недостаточно чиста? Прежде всего, спокойствие и контрольные опыты.

Все начинается сначала. Он берет тщательно очищенную воду и заменяет стеклянный сосуд на сосуд из плавленого кварца. Вода дважды дистиллирована и практически не содержит примесей. Он терпеливо сидит в темноте, восстанавливая остроту зрения. Опыт начинается и приводит к тому же. В растворе нет ни следа ураниловой соли, но свечение сохраняется. Ему не удается отделить мешающий свет от люминесценции раствора. Что же дальше?

Проходят дни за днями. Слухи о странных опытах Черенкова облетели весь институт. Товарищи встречают его то сочувственным, то насмешливым вопросом:

— Все еще светится?

Молодые и старые физики заходили в лабораторию к Черенкову, чтобы собственными глазами увидеть странное свечение, которого никто еще не замечал. Приходили поразмыслить, дать совет.

Черенков не находил себе места. Ведь, столкнувшись с неожиданным, ученые обычно меньше всего думают, что эти странности принесут им Нобелевскую премию. Прежде всего экспериментатор ищет возможную ошибку. И он будет повторять опыт до тех пор, пока не устранил погрешность или не убедится, что его наблюдения не результат ошибки, а скрытая дотоле закономерность.

Проходили недели, месяцы, а Черенков все бился над загадкой непонятного, упорного свечения. Что же делать, как быть дальше?

Здесь возможно множество путей. Выбор их зависит от индивидуальности ученого, от его кругозора, от интуиции, наконец, от темперамента. Многие советуют Черенкову бросить чепуху, отдохнуть, заняться другим.

Но Черенков хочет прежде всего ясности. Он должен узнать, почему не удался опыт, чем вызывается свечение, от которого невозможно избавиться. Почему светится дистиллированная вода? Ведь до сих пор считалось, что она не способна к люминесценции. Светится ли сама вода или это остатки примесей? Однако... Он не может ничего сказать, пока не убедится в том, что вода действительно чиста. Может быть, все дело в стекле? Может быть, стекло хотя и слабо, растворяется в воде и дает это свечение?

Черенков тщательно сушит свой прибор и наливает в него другую жидкость. Все то же. Он пробует одну до предела очищенную жидкость за другой. Свечение не исчезает.

Долой стекло! Он берет чистейший платиновый тигель. Под его дно он кладет ампулу с большим, чем раньше, количеством радия. Гамма-лучи от ста четырех миллиграммов радия проходят через дно тигля в жидкость. Сверху на жидкость направлен объектив прибора.

Жидкость предельно чиста, но свечение почти не ослабело. Теперь он уверен: яркое свечение концентрированных растворов — это не люминесценция. Слабое свечение чистых жидкостей имеет другую природу. Но он продолжает исследования.

И вот молодой ученый докладывает о своей работе. Шестнадцать чистейших жидкостей — дистиллированная вода, различные спирты, толуол и другие — обнаружили слабое свечение под действием гамма-лучей радия. В отличие от ранее известного, это свечение не распространяется во все стороны подобно свету от лампы, а видно лишь в узком конусе. Ось этого конуса совпадает с направлением гамма-лучей.

Установлено, что во всех этих жидкостях яркость свечения почти одинакова. Сильнее всего она в четыреххлористом углероде, слабее — в изобутиловом спирте. Но разница невелика — всего 25 процентов. Он добавлял во все жидкости азотнокислое серебро, йодистый калий и другие сильнейшие тушители люминесценции. Никакого эффекта — свечение не прекращалось. Он нагревал жидкости, это сильно влияет на люминесценцию, но яркость свечения не изменялась. Теперь он может поручиться, что это не люминесценция.

В 1934 году, после двух лет тщательного исследования, в «Докладах Академии наук СССР» появляется статья Черенкова об открытии нового типа свечения.

Сейчас черенковское излучение может увидеть каждый посетитель выставки достижений народного хозяйства в Москве. Здесь под пятиметровой толщей воды мягко сияет экспериментальный атомный реактор. Свечение, окружающее его, — это черенковское излучение, вызываемое в воде мощным радиоактивным излучением реактора.

Угол зрения

Волга рождается на Валдайской возвышенности в виде маленького родника. Не скоро она разливается могучей рекой, поражающей своей мощью.

Новое открытие вошло в науку не без труда. Многие ученые, в том числе и крупные, сомневались, считали, что опыты поставлены не чисто.

В то время уже было установлено, что люминесценция во всех случаях вызывается не самими гамма-лучами, а электронами, освобождающимися под их влиянием внутри жидкости. Электроны ударом возбуждают атомы растворенного вещества. В ответ атомы излучают свет. Таков механизм люминесценции, утверждали специалисты, и нечего тут мудрить.

— То, что наблюдает Павел Алексеевич, не люминесценция, — возражал руководитель Черенкова, крупнейший специалист в области люминесценции С. И. Вавилов.

Черенков не тратил времени на споры. Он работал, Он продолжал ставить опыты. А опыты красноречивее слов.

Поместив свой прибор в магнитное поле, Черенков доказал, что и «его» свечение тоже вызывается электронами, выбиваемыми гамма-лучами радия из атомов жидкости.

— Вот видите! Это же типичная люминесценция, — говорили его противники. — Что же вы упираетесь?

— Нет, не люминесценция, — возражал Черенков. — Свет, возбуждаемый люминесценцией, распространяется во все стороны с одинаковой яркостью. Новое излучение распространяется лишь в узком конусе, вершина которого указывает на место, где расположена ампула с радием.

И следующим опытом он опять подтверждал свое мнение, получив такое же конусообразное свечение чистых жидкостей под действием не гамма —, а бета-лучей, то есть быстрых электронов, выделяющихся непосредственно при радиоактивном распаде.

Целым каскадом экспериментов Черенков продолжал доказывать, что открытое им свечение не люминесценция.

Его поддержал Вавилов. Сергей Иванович высказал предположение, что свечение вызвано резким торможением электронов в жидкости, явлением, уже известным физикам. Но дальнейшие наблюдения опровергли эту догадку.

— Иногда факт отказывается подтвердить теоретическое истолкование, которое ему хотели дать, — сказал как-то по другому случаю французский ученый Луи де Бройль.

Весь небольшой коллектив лаборатории размышлял над загадкой. Но эксперименты по-прежнему вел один Черенков.

Почти три года ушло на проведение тщательных исследований. Увеличив источник гамма-лучей до 794 миллиграммов радия, Черенков добился столь большого повышения яркости таинственного излучения, что ему удалось зафиксировать его на фотографии. Но никакие опыты по-прежнему не могли непосредственно выявить природу свечения, установить его происхождение, объяснить механизм возникновения. Было совершенно надежно доказано то, что свечение вызывается электронами, летящими внутри чистой, неспособной к люминесценции жидкости.

Учитель и ученик были убеждены в том, что свечение имеет своеобразную, пока неизвестную природу и его источником являются быстрые электроны.

Это был один из тех случаев, когда следующий шаг должна была сделать теория.

Тут Черенкову посчастливилось. Его опыты привлекли внимание двух физиков, которым суждено было стати выдающимися учеными нашего времени. Одним из них был Илья Михайлович Франк, ставший позже академиком. Он в одинаковой степени тяготел и к эксперименту и к теории. Он как бы сцементировал всю тройку. Стал связующим звеном между двумя «полюсами» — «чистым» экспериментатором Черенковым и «чистым» теоретиком Таммом. Уже тогда Игорь Евгеньевич обещал сделаться тем, кем стал для современной физики академик Тамм, — идущим впереди. Игорь Евгеньевич стал во главе тройки! Но это произошло позже. До этого Франку приходилось участвовать во многих обсуждениях совместно с Вавиловым и Черенковым. Эти обсуждения зачастую происходили в полной темноте. Вавилов, экономя время, требовавшееся для подготовки глаз к сложному эксперименту, приходил в лабораторию, чтобы обсудить полученные результаты и программу предстоящих опытов. Франк находился там в качестве добровольного помощника, если Черенков просил его о содействии. В ФИАНе (Физическом институте АН СССР) уже в те годы был силен дух научной взаимопомощи.

Деловое общение, непосредственное участие в экспериментах, воодушевляющие беседы сыграли благотворную роль в дальнейшей теоретической работе Франка. Он чувствовал, как из почти незаметного свечения возникали загадки, наблюдал за попытками опытного физика отделить главное от второстепенного. Обсуждал свои сомнения с Таммом.

Тамм заинтересовался этим не сразу. У него были свои проблемы, а в опытах Черепкова сущность могла быть скрыта видимостью, возникавшей случайно. Но когда и на случайность, на загрязнения и примеси были отвергнуты одна за другой, Тамм увлекся. Началась совместная работа.

Три молодых исследователя еще не знали, что дружба их закрепится на много лет. Что за ее плечами будет много покоренных вершин и в науке, и в альпинизме. Они не подозревали, что вместе взойдут на пик Тамма — так окрестили впоследствии ученики Игоря Евгеньевича одну из безымянных вершин Алтая. Если бы наши герои знали, что в день 60-летия друзья преподнесут Тамму альпинистскую палатку с надписью:

«Идет к вершинам Игорь Тамм,

а мы за Таммом по пятам»,

они, возможно, сделали бы эти слова своим девизом.

Объектом первого совместного восхождения знаменитое ныне трио выбрало черенковское свечение.

Что же увидели ученые с вершины?

Катер разрезает гладкую поверхность воды, и по обе стороны от него, подобно журавлиному клину, разбегаются две волны. Если бы недалеко один от другого с одинаковыми скоростями шли два катера, можно было бы заметить, что они образуют одинаковые волны. Если же один из катеров идет быстрее другого, то образуемые им волны разбегаются под более острым углом.

Если скорость катера уменьшается, то угол, под которым разбегаются носовые волны, увеличивается. Когда же его скорость становится меньше, чем скорость движения волн на поверхности воды, носовые волны исчезают совсем.

Понять механизм образования носовой волны нетрудно. Бросим в воду камень. От места его падения во все стороны побегут круги. Сколько раз ни кидать камни в одно и то же место, ничего похожего на носовую волну не получится. Лишь круглые кольца волн будут одно за другим разбегаться от места падения камней. Но если кидать камни с грузовика, едущего по берегу быстрее, чем бегут волны по поверхности воды, картина изменится. Круги, возникающие от падения отдельных камней, будут накладываться один на другой и образуют полное подобие носовой волны. Отдельные круговые волны складываются воедино, образуя две больших волны, разбегающиеся под углом, который зависит от скорости движения грузовика. В остальных направлениях отдельные круги гасят друг друга.

Попросим, чтобы шофер вел грузовик по берегу очень медленно, и повторим опыт. Теперь отдельные круги не смогут пересечься. Ведь все волны бегут с одинаковыми скоростями, а значит, круги не могут догнать друг друга и наложиться один на другой. Они разбегаются таким образом, что круги, образовавшиеся от падения первых камней, всегда остаются снаружи остальных.

Совершенно так же обстоит дело при движении катера. Разрезая форштевнем воду, катер образует волны. Если катер идет со скоростью большей, чем скорость волн, то в результате их сложения образуются носовые волны.

Носовые волны образуются не только на поверхности воды, но и во всяком другом случае, когда источник перемещается быстрее, чем бегут образуемые им волны. Пули и снаряды, скорость которых больше скорости звука в воздухе, образуют волну, тянущуюся за ними в виде узкого конуса. Такие же волны образуются за самолетом, летящим со сверхзвуковой скоростью.

Сильная сжимаемость воздуха, сопровождающаяся его нагреванием при сжатии, придает воздушной носовой волне особые свойства. По мере возникновения такой волны ее фронт становится все более крутым, скачок давления на ее фронте все более увеличивается. Вследствие этого новая волна в воздухе приобретает особенности ударной волны, образуемой при взрыве.

На заре сверхзвуковой авиации многие удивлялись взрывам, раздававшимся особенно часто при ясной погоде. Передавали друг другу различные варианты происхождения этих таинственных взрывов. Упоминались и аварии самолетов, и взрывы светильного газа, и многое другое.

Теперь все знают, что эти мощные удары вызываются не взрывом, а ударной волной — носовой волной, тянущейся за сверхзвуковым самолетом. Мощность этих волн так велика, что во избежание несчастных случаев сверхзвуковые самолеты не сближаются с обычными самолетами и не летают на малых высотах над населенными пунктами.

Опыт показал, что, летя на бреющем полете, сверхзвуковой самолет буквально звуком вышибает окна и двери в домах, разрушает легкие постройки и опрокидывает стоящие на земле самолеты. В связи с этой особенностью за рубежом даже возникали проекты создания самолетов-штурмовиков, воздействующих на противника ударной волной.

Но вернемся к загадочному черенковскому излучению. Теперь общепризнанно, что излучение, открытое Черенковым, не что иное, как ударная световая волна!

Конечно, можно возразить: для образования ударной звуковой волны самолет или снаряд должен лететь быстрее звука. Значит, для образования ударной световой волны электрон должен лететь быстрее света? Но как это может быть? Ведь Эйнштейн еще восемьдесят лет тому назад понял, что ни одно тело, ни одна элементарная частица не может передвигаться со скоростью, превосходящей скорость света в пустоте.

Эта-то последняя оговорка и спасает положение.

Дело в том, что в веществе свет распространяется медленнее, чем в пустоте, а в некоторых веществах даже намного медленнее. Поэтому ничто не препятствует электрону,

обладающему достаточной энергией, обогнать световую волну, бегущую в веществе. А при этом уже может образоваться ударная световая волна.

Теорию, объясняющую возникновение черенковского излучения, Тамм и Франк создали в 1937 году. Они неопровержимо доказали, что Черенков действительно открыл совершенно новый вид светового излучения. Отдавая должное вкладу своего учителя в открытие и объяснение природы этих волн, Черенков предложил назвать их излучением Вавилова — Черепкова.

Как же объяснили они увиденное Черенковым?

Когда жидкость, даже простая дистиллированная вода, облучается гамма-лучами радия, эти лучи выбивают из атомов жидкости электроны. А так как электроны — крошечные сгустки материи — очень легки, то удар кванта гамма-лучей действует на них, как удар ракетки на теннисный мяч. Вот почему электроны вылетают из атомов с колоссальными одинаково направленными скоростями.

Электрон, летящий в жидкости, сильно взаимодействует с атомами, лежащими вблизи его пути. Электроны этих атомов тоже начинают излучать. В результате в веществе возникают световые волны, которые разбегаются во все стороны от летящего электрона.

Если электрон летит медленнее света, то световые волны, исходящие от различных участков его пути, гасят друг друга, и мы не видим световых волн, так же как не видим носовую волну корабля, движущегося с очень малой скоростью. Иное дело, если электрон летит быстрее, чем скорость света в веществе. В этом случае световые волны, возбуждаемые электроном по мере его продвижения в веществе, складываются, образуя разбегающуюся в виде конуса световую волну.

Светящийся хвостик электрона, вернее, электронов — их в жидкости во время этого опыта летит множество — и увидел Черенков. Если бы свет, испускаемый электронами распределялся равномерно, как при люминесценции, вероятно, обнаружили бы не скоро. Конусообразное распределение света в направлении движения электронов — вот что привлекло внимание Черепкова, вот что надо на мысль об особой природе этого свечения, вошедшего в историю науки как излучение Вавилова — Черепкова.

Так объяснили Тамм и Франк странное на вид свечение. И их теория блестяще совпала со всеми опытами Черепкова, сделанными им за пять лет неустанного труда. Упорство Черепкова победило. Оправдались вдохновляющие слова английского писателя Оскара Уайльда: «Верь в себя, и другие в тебя поверят». Черенков был убежден в том, что стоит на пороге неведомого. Эту убежденность подтвердили математические расчеты. В новое открытие в конце концов поверили все.

Тетрадка в пять страниц

Много позже Вавилов обнаружил, что знаменитый лорд Кельвин еще в 1901 году указал на то, что атом, летящий в пустоте со сверхсветовой скоростью, должен создавать электромагнитную волну, аналогичную волнам Маха в акустике, ударным или носовым волнам, о которых упоминалось на предыдущих страницах.

В то время еще никто не знал, что ни одно материальное тело, в том числе и атом, не может лететь в пустоте со скоростью, превышающей скорость света. Теория относительности, основанная на постулате о скорости света как предельной скорости, была создана лишь четыре года спустя, а признание справедливости этого постулата пришло еще позже.

Но не невозможность сверхсветовой скорости явилась причиной тому, что указание Кельвина не получило дальнейшего развития и было забыто. Объяснение давней истории дал в 1961 году Франк. Он писал:

«Высказывание такого крупного физика, как Кельвин, разумеется, не могло быть забыто случайно. В нем, как вскоре выяснилось, содержалась существенная ошибка. Как ни странно, эта ошибка состояла в том, что Кельвин не довел свою аналогию со звуковыми

волнами до конца.

...Теперь известно, что если сопоставить возникновение электромагнитных волн в среде с упругими волнами, то аналогия эффекта Вавилова — Черепкова с волнами Маха проявилась бы полностью. Однако во времена Кельвина такая постановка вопроса была бы крайне надуманной. Принималось, что свет распространяется в среде, которую называли мировым эфиром, и пытались наделить его своеобразными упругими свойствами. Поэтому в то время естественно было искать аналогию между свойствами волн в эфире и упругими акустическими волнами. Рассматривать движение заряженной частицы в плотной среде не было оснований, тем более что такой случай, как движение атома в плотной среде, не представлялся реальным».

После того как теория относительности стала общепризнанной, а предельная роль скорости света в пустоте стала одной из фундаментальных основ науки, высказывание Кельвина отошло в прошлое вместе с эфиром. Впрочем, предыстория этим не закончилась. В 1904 году выдающийся физик-теоретик Зоммерфельд рассчитал силу, тормозящую движение заряда, летящего со сверхсветовой скоростью в пустоте. Это было за год до создания теории относительности, а эксперименты с катодными лучами — заряженными частицами, летящими в пустоте, — привлекали всеобщее внимание.

На эту работу Зоммерфельда указал Тамму и Франку замечательный советский физик А. Ф. Иоффе. Об этом можно прочесть в статье Тамма и Франка, содержащей первое и безупречное объяснение опытов Черенкова. Теория относительности передала работу Зоммерфельда в архив науки, несмотря на то что расчеты в ней были верны. Однако верные расчеты относились к нереальному случаю сверхсветовой скорости в пустоте.

Но и это не было началом предыстории. В начале 1974 года А. А. Тяпкин направил в редакцию журнала «Успехи физических наук» письмо «О первом теоретическом предсказании излучения, открытого Вавиловым и Черенковым».

Тяпкин пишет, что недавно, просматривая работу О. Хевисайда «Об электромагнитных эффектах при движении электризации через диэлектрик», опубликованную в 1889 году, он обнаружил в ней параграф, специально посвященный движению заряда через диэлектрик со скоростью, превышающей скорость распространения света в диэлектрике. Тяпкин, обращаясь к физикам, не считает нужным подчеркнуть, что речь идет о движении заряда в диэлектрике, а не в пустоте. Что Хевисайд рассматривает задачу, точно соответствующую условиям опыта Черепкова. Вместо этого он приводит цитату из статьи Хевисайда.

Хевисайд пишет: «Ясно прежде всего, что здесь совсем не может быть возмущения впереди движущегося заряда (точечного для простоты)».

Отметим два обстоятельства. Первое — «здесь» указывает на условия, для которых проводится расчет: для заряда, движущегося быстрее скорости света в диэлектрике. Второе — Хевисайд строит свою теорию впрок. В то время электрон еще не был открыт и никто не знал ничего о возможности движения точечного заряда внутри диэлектрика. Так теория прокладывает путь эксперименту. Путь в будущее.

Результат Хевисайда таков: сферические волны, излучаемые движущимся зарядом, образуют коническую волну, в вершине которой — сам заряд.

Вновь возникает вопрос: почему предсказание Хевисайда прошло незамеченным и почему сам Хевисайд не возвратился к этой проблеме после открытия электрона, после открытия радиоактивности, после открытия космических частиц? Этот вопрос совсем недавно (в 1984 году) обсуждал Франк. Он считает удивительным, что Хевисайд пишет о движении заряда в диэлектрике, а не в пустоте, и) находит ответ у самого Хевисайда:

«...Следует отметить, что сказанное выше не является описанием того, что имело бы место, если бы заряд заставили двигаться через эфир со скоростью, в несколько раз превышающей скорость света, об этом я ничего не знаю; но это описание того, что случилось бы, если Максвеллова теория диэлектриков справедлива для рассматриваемого случая и если я не ошибаюсь в ее интерпретации».

Франк отмечает, что Хевисайд опасается считать теорию применимой к скоростям,

превышающим скорость света в пустоте, что он, рассмотрев движение заряда со сверхсветовой скоростью в диэлектрике, оказался в этом вопросе более проницательным, чем Кельвин и Зоммерфельд.

Мысленный опыт Хевисайда не противоречил теории Максвелла для диэлектриков, хотя он и делает оговорку: «...если я не ошибаюсь в ее интерпретации».

Еще один вопрос к предыстории. Почему так долго после начала систематических исследований радиоактивности никто не обнаружил излучения Вавилова — Черенкова?

Научные журналы хранят статьи М. Малле, который в 1928–1929 годах опубликовал несколько работ по наблюдению свечения жидкостей под действием гамма-лучей.

Он установил, что в нескольких жидкостях наблюдается свечение, обладающее во всех случаях одинаковым и сплошным спектром. Он высказал предположение, что наблюдаемое им свечение, возможно, универсально. Теперь ни у кого не возникает сомнения в том, что Малле наблюдал излучение Вавилова — Черенкова. Но он не разобрался в увиденном, не изучил характеристик явления, необходимых для правильного понимания его природы, для разработки теории явления.

Малле остался в плену обычных работ по исследованию люминесценции. Отметив необычность своих наблюдений, он не пошел дальше. Он не вышел за пределы обычных экспериментов.

Мы знаем, каких усилий потребовал простой вывод Вавилова — «это не люминесценция».

Черенков, в отличие от Малле, пользовался новым методом, методом, разработанным Вавиловым и Брумбергом практически перед его опытами. Этот метод основан на сравнении интенсивности слабого излучения с порогом зрительного восприятия глаза, адаптированного к темноте. Никаких методов, сравнимых с этим по точности и чувствительности, тогда не существовало.

И еще одно обстоятельство. В сложных ситуациях неожиданный результат опыта редко приводит к открытию, если своевременно на помощь не приходит теория. Здесь они шли рука об руку.

И в заключение: многовековая история науки свидетельствует о том, что открытия — плоды индивидуального творчества. Здесь же впервые открытие осуществлено коллективно. У него четыре автора.

Если относить к предыстории все, что происходило до 1937 года, до выхода из печати статьи Тамма и Франка, объяснившей во всех деталях эффект Вавилова — Черенкова, то нельзя обойти молчанием курьезный случай, живо описанный Франком.

«Я вспоминаю, — читаем мы в статье Франка, опубликованной в 1984 году, — что, когда осенью 1936 года приехал в Москву Жолио-Кюри (известный специалист в области радиоактивности. — И. Р.), ему был продемонстрирован опыт Черепкова, теперь вошедший в популярные книги. Вертикально поставленный стеклянный цилиндрический сосудик с жидкостью с боков был окружен коническим зеркалом. Если смотреть на зеркало сверху, то можно было видеть угловое распределение излучения, выходявшего в горизонтальной плоскости через стеклянные стенки цилиндра. Когда препарат радия помещался сбоку от цилиндра, то отчетливо были видны два максимума излучения под острым углом к направлению гамма-лучей. Сделанные Черенковым фотографии таких колечек с неравномерным почернением в различных азимутах теперь общеизвестны, а сам опыт нагляден и безупречно убедителен, если, конечно, не заподозрить элементарной ошибки, граничащей с жульничеством. Именно такая мысль, видимо, возникла у Жолио-Кюри, который немедленно начал поворачивать сосудик и зеркало вокруг оси, чтобы убедиться, что прозрачность стекла или качество серебрения зеркала не играет здесь роли. В обсуждении же опыта им был сделан намек на аналогию с лучами Бландло. Этому не следует удивляться. Демонстрацию опыта приходилось проводить в полной темноте, причем даже при некоторой адаптации глаза свечение было на пределе видимости. Вся обстановка была в самом деле необычна для физического эксперимента и напоминала нечто вроде спиритического сеанса

или опыта с применением «ловкости рук».

И еще один эпизод из воспоминаний Франка, бросающий свет на стиль работы физиков.

«...Как-то поздно вечером И. Е. Тамм позвонил мне по телефону и попросил немедленно приехать к нему домой.

Я застал И. Е. Тамма за столом, увлеченного работой и же исписавшего много листов бумаги формулами. Он сразу же принялся рассказывать мне о сделанном им до моего прихода... Домой я возвратился под утро пешком, так как городской транспорт уже закончил (или еще не начал) свою работу».

Франк сохранил школьную тетрадку, пять с половиной страниц, заполненных торопливой рукой Тамма со многими исправлениями. Результат, выраженный короткой формулой, правилен, но вывод формулы существенно отличается от содержащегося в опубликованной статье.

«Результаты Черепкова и их теоретическая интерпретация, — вспоминает Франк, — первоначально были замечены лишь советскими физиками. Видимо, иностранные ученые мало читали в то время наши журналы (хотя «Доклады Академии наук» печатались на двух языках: на русском и иностранном). Уже после того, как в исследование явления была внесена полная ясность, С. И. Вавилов в 1937 году направил небольшую статью П. А. Черенкова, суммировавшую полученные результаты и их сравнение с теорией, в «Nature» (английский журнал «Природа». — И. Р.). Не помню, под каким благовидным предлогом, но статья была отклонена».

Бочка для микрочастиц

Но даже после того как теоретики свели концы с концами, увязали эксперимент с теорией, когда новое открытие было единодушно принято в лоно науки, Черенков продолжал работать в прежнем направлении.

Он понимал, что работа с новым видом излучения только начинается.

То, что наблюдал Черенков, было знакомством лишь со свечением частиц одного типа — электронов. Но, кроме электронов — отрицательно заряженных частиц, наука знает много частиц, обладающих электрическим зарядом. Это лептоны и мезоны, протоны — ядра атомов водорода и ядра более тяжелых элементов.

Исследователю не терпелось поставить и их на место электронов. Он предчувствовал, что и положительно заряженные частицы вещества, если их скорости достаточно велика, тоже способны сигнализировать светом. А если это так, в этом столько практических возможностей, что...

И вот однажды — это было уже после Отечественной войны (война надолго прервала исследования) — сотрудники Черепкова взяли стеклянный сосуд, налили в него жидкость, а затем закупили.

Потом отправились к ускорителю заряженных частиц. Там они поставили сосуд на пути потока протонов, рождающихся в ускорителе, и стали наблюдать. В сосуде вспыхнуло слабое сияние. Ученые усилили поток. Сияние стало ярче. Тогда они тщательно измерили силу свечения и угол, под которым было видно излучение, и, вынув блокноты, начали делать какие-то расчеты.

Работающие на ускорителе с интересом наблюдали за ними. Через некоторое время приезжие точно назвали величину скорости и энергии протонов. Они сделали это гораздо быстрее, чем делалось на ускорителе раньше, и всего лишь с помощью одного сосуда. А ошиблись при этом меньше чем на 0,1 процента. Приезжие уверяли, что таким же способом они могут измерить и скорость других заряженных частиц!

Объясняя действие прибора, они напомнили о волнах, разбегающихся по воде от движущегося катера. И утверждали, что, если бы на катере вышли из строя обычные приборы для измерения скорости, капитан смог бы определить его скорость, измеряя угол,

под которым расходятся крылья носовой волны.

Вы наверное, уже догадались, что в сосуде с жидкостью образуется черенковское излучение, которое и могло ученым определить скорость и энергию протонов. Сосуд называли счетчиком Черепкова и включили в список важнейших физических приборов.

Заметим, что к этому времени работа со счетчиками Черенкова упростилась еще больше. Появились фотоумножители, приборы, очень чувствительные к свету, улавливающие даже порции из нескольких световых квантов. Чтобы наблюдать черенковское излучение, ученым теперь не приходится часами сидеть в темноте. Специальные электронные приборы автоматически ведут подсчет фотонов черенковского излучения, замечая и то, чего не мог заметить самый натренированный глаз.

Счетчики Черенкова прогремели на весь мир. Ими был оборудован один из крупных американских ускорителей — беватрон, дающий частицы с энергией 6,3 миллиарда электрон-вольт. Вскоре с их помощью было сделано замечательное открытие. В числе известных частиц были опознаны две новые, о которых еще не знал никто на свете, — антипротон и антинейтрон.

Черенковские счетчики стали одними из главных инструментов при исследованиях, проводимых на ускорителе — синхрофазотроне на 10 миллиардов электрон-вольт, построенном советскими учеными в городе Дубне, а затем и на всех других ускорителях.

Счетчики Черенкова оказались способными не только определять скорость и энергию быстрых заряженных частиц, но могли (с высокой точностью) указать направление, откуда прилетели эти частицы. Ведь черенковское излучение имеет вид очень острого конуса. И конус этот расширяется вдоль направления полета частицы.

О каком же еще более удобном и точном приборе могли мечтать ученые, изучающие космические частицы, прилетающие на Землю из глубин космоса!

Ведь раньше, чтобы определить направление прилета частиц, надо было собирать сложные и громоздкие установки. Телескоп — так называлась одна из этих установок — состоял из целого набора счетчиков иного типа, чем черенковские, расположенных один за другим, да еще из специальной электронной схемы.

И такую установку смог заменить всего лишь один счетчик Черенкова!

Как же могли не воспользоваться ученые такой находкой? И уже в 1951 году они обнаружили черенковское излучение от мю мезонов — особых элементарных частиц, содержащихся в космических лучах, а еще через год — от космических протонов.

Но и этим не исчерпались замечательные свойства счетчиков Черенкова.

Сама природа образования ударной световой волны приводит к тому, что они обладают еще одной очень важной особенностью. Они хорошо «видели» одни частицы, но не хотели замечать другие. Они были избирательны в своем отношении к космическим пришельцам. Счетчики обладали, как сказал бы ученый, пороговым эффектом.

Казалось, это огромный недостаток.

Казалось, они могут пропустить, не заметить важную частицу. Но этот-то недостаток и обернулся достоинством.

Дело в том, что счетчик Черенкова не хочет замечать лишь медленные частицы. Те частицы, скорость которых меньше скорости света в веществе, из которого сделан сам счетчик, не создают в нем черенковского излучения, а значит, счетчик не считает.

И чудесно! Ученые поняли: изготавливая счетчики из различных веществ, можно изменять величину пороговой скорости.

Так можно измерять скорость космических частиц, энергия которых столь велика, что ее невозможно измерить другими приборами.

Эти замечательные способности счетчиков Черенкова и дали им право полететь уже на первых советских искусственных спутниках и ракетах. И они не только помогли обнаружить корону Земли — три пояса заряженных частиц, ореолом опоясывающих Землю, — но и дали возможность раскрыть секрет состава космических лучей.

Над этим вопросом давно и безуспешно бились ученые. Как определить химический

состав космических частиц? Как узнать, частицы каких элементов залетают к нам из космоса?

И тут проявилось еще одно уникальное свойство черенковских счетчиков. Они оказались способными не только определить скорость, энергию и направление прилета частицы, но и измерить ее заряд. Выяснилось, что чем больше заряд частицы, залетевшей в счетчик Черенкова, тем более яркий хвост сопровождает ее, тем большая часть ее энергии переходит в свет на каждом сантиметре ее пути. Тем более яркое излучение Вавилова — Черенкова она вызывает. Таким образом, яркость и сила свечения, острота светового конуса точно и однозначно указывают, какая частица залетела в счетчик, ядром какого элемента она является. Так ученые узнали, что в составе космических лучей есть ядра водорода и гелия, железа и многих других элементов, имеющих на Земле.

Благодаря счетчикам Черенкова люди узнали, что и Земля, и далекие миры, которые прислали нам своих космических посланников, состоят из одних и тех же элементов, что химический состав в огромных областях Вселенной одинаков.

Для исследования космического пространства приходится изготавливать счетчики Черенкова, имеющие очень малые размеры.

Но в институте, где работает Павел Алексеевич, стоит такой огромный бак с водой, что заглянуть в него можно, лишь забравшись по лестнице на второй этаж. В этом баке — самом большом в мире счетчике Черепкова — налито сто тонн воды! Просто не верится, что необходимо такое огромное сооружение для определения свойств частички, залетевшей в бак с неба!

Но конечно, сделано это не напрасно.

Конструкторам пришлось сделать бак таким большим для того, чтобы космическая частица, пролетая через него, успела превратить в нем в свет всю свою энергию. И тогда, измеряя интенсивность свечения фотоумножителем, можно определить полную энергию влетевшей в бак частицы.

Новые применения

Но и это не рекорд. Известны эксперименты, в которых чувствительные фотоприемники попросту размещали в глубине океана — и они фиксировали излучение Вавилова — Черепкова, образуемое космическими частицами, пронизывающими толщу воды.

Возможность детектирования нейтрино по черенковскому излучению в воде на больших глубинах океана была рассмотрена в 1969 году членом-корреспондентом АН СССР Е. А. Чудаковым. Он указал, что толща воды надежно экранирует фотоприемники черенковского излучения от воздействия всех частиц, кроме нейтрино и мюонов.

Конкретный проект такого эксперимента был выдвинут в 1975 году большим коллективом американских ученых. Проект получил наименование ДЮМАНД — по первым буквам английских фраз, определяющих его существо: глубоководное детектирование мюонов и нейтрино. В разработке этого проекта активно участвовали советские ученые. Масштабы установки поражают воображение. Объем воды, участвующей в эксперименте, образует куб, каждая грань которого равна одному километру. Объем установки равен миллиарду кубометров.

Вся установка располагается на 5-километровой глубине. На этой глубине вблизи Гавайских островов вода столь чиста, что фотоумножитель способен надежно зафиксировать вспышку черенковского излучения на расстоянии двадцати метров. Это определяет требуемое количество фотоумножителей — свыше тысячи.

Их сигналы будут обрабатываться ЭВМ, располагаемой на берегу.

Вокруг открытия Черепкова и после его признания бушевало много споров. Особенно относительно его практического применения. В дискуссиях рождались интересные идеи. Одну из них высказал еще при обсуждении докторской диссертации Черепкова академик

Мандельштам. Он предположил, что для наблюдения эффекта Черепкова вовсе не обязательно пропускать электроны через вещество, где они довольно быстро тормозятся встречными атомами. По его мнению, достаточно пропустить пучок быстрых электронов не через вещество, а вблизи его поверхности. Можно даже попытаться «вспрыснуть» их в канал, проделанный в твердом теле.

Электроны, пролетая близко к его поверхности, будут возбуждать в атомах вещества электромагнитные волны. Если электроны летят быстрее, чем возбуждаемые им в веществе волны, значит, в веществе возникает ударная черенковская волна излучения.

Электроны летят в пустоте и поэтому, конечно, не могут лететь быстрее света. Но достаточно, чтобы они летели быстрее, чем электромагнитная волна, бегущая внутри диэлектрика. В этом случае волны, возникающие в диэлектрике под воздействием пролетающего электрона, обязательно будут складываться в черенковскую волну, которая распространится внутри диэлектрика, а затем...

А затем рожденные таким образом электромагнитные волны могут быть излучены в пространство.

Мысль Мандельштама была не просто красивой иллюстрацией механизма возникновения черенковского излучения. Она указывала на большие практические возможности.

В 1947 году физик-теоретик В. Л. Гинзбург развил мысль Мандельштама.

Он тщательно изучил черенковское излучение в твердых телах и пришел к выводу, что таким образом можно просто осуществить генерацию очень коротких, миллиметровых и даже субмиллиметровых волн. То есть создать новые генераторы радиоволн. Для радиотехники, которая все время борется за все более и более короткие волны, такие генераторы были бы просто находкой.

Таким способом можно получить особенно мощные радиоволны, используя не сплошной поток электронов, а электроны, предварительно сгруппированные в небольшие сгустки.

Оказалось, это не единственный способ получения радиоволн с помощью эффекта Черенкова. Ведь мы знаем, что для возникновения эффекта достаточно уменьшить скорость электромагнитной волны до величины меньшей, чем скорость электрона, и черенковское излучение начнется.

Однако скорость электромагнитных волн можно уменьшить, не только пропуская их через диэлектрик. Во многих случаях сантиметровые и миллиметровые волны передаются с помощью специальных металлических труб — волноводов. Если внутри трубы установить ряд перегородок с отверстиями, то скорость распространения волны по такой трубе сильно уменьшится.

Значит, выбрав подходящие размеры трубы и перегородок, откачав из трубы воздух и пропустив через нее пучок быстрых электронов, сгруппированных в сгустки, можно получить мощное черенковское излучение миллиметровых волн. Оно будет образовываться здесь в результате взаимодействия электронов с отдельными отсеками волновода и сложения образующихся при этом электромагнитных волн.

Так эффект, открытый советским ученым и казавшийся ранее лишь интересным физическим явлением, уже входит в технику.

Создание лазеров позволило по-новому взглянуть на пути и возможности практического применения когерентного излучения свободных электронов. Появились приборы, сущность которых отражена в самом названии: лазеры на свободных электронах.

Первоначально такое сочетание казалось бессмысленным, ибо излучение лазеров представлялось возникающим только при переходах электронов внутри атома, молекулы или иона. Правда, затем появились полупроводниковые лазеры и лазеры на вынужденном комбинационном рассеянии, но и в этих случаях излучение возникало в результате перехода электронов с изменением их доли энергии во внутренней энергии вещества.

Конечно, различные электронные лампы позволяют применять для получения

электромагнитных волн потоки свободных электронов. Но это относится к совершенно другой области науки и техники.

Лазеры на свободных электронах — действительно лазеры.

Их основой является взаимодействие релятивистских электронов с внешними магнитными полями. Релятивистских — значит движущихся со скоростями, близкими к скорости света в пустоте. Получение пучков таких электронов стало технически достижимо только после создания современных ускорителей.

Основное отличие лазеров от остальных источников излучения — когерентность, то есть жесткая согласованность процессов испускания фотонов в различных областях пространства. Возможность таких процессов, обусловленная взаимодействием отдельных актов испускания через электромагнитное поле, порождаемое ими, была показана еще в 1927 году одним из творцов квантовой физика Шредингером. Он поставил вопрос о том, возможен ли вынужденный эффект Комптона, и пришел к выводу о том, что он возможен. В то время никто не усмотрел путей практического применения такого процесса. Теперь всем ясно, что модель, рассмотренная Шредингером, совпадает со схемой Комптон-лазера, как называют один из вариантов лазера на свободных электронах.

Долгое время оставалась незамеченной опубликованная в 1933 году совместная работа двух гигантов современной науки П. Дирака и П. А. Капицы. Они рассмотрели процесс вынужденного рассеяния при взаимодействии электронов со стоячей электромагнитной волной. Этот процесс приводит к генерации когерентных электромагнитных волн в некоторых типах электронных ламп, а также в созданном Капицей оригинальном мощном генераторе-нигатроне.

Все реализованные лазеры на свободных электронах так или иначе опираются на пионерские работы В. Л. Гинзбурга, начатые им в 1947 году. Основные усилия в этой области направлены на увеличение мощности излучения и укорочение длины волны.

Излучение Вавилова — Черенкова в диапазоне рентгеновских волн было получено группой Э. И. Денисова Я 1981 году при помощи линейного ускорителя электронов ЛУЭ-2 в Харьковском физико-техническом институте./ Теоретические оценки показывают, что существуют условия, при которых это излучение может быть получено даже в диапазоне гамма-волн.

Эффект Вавилова — Черенкова порождает новые идеи и разнообразные приборы и устройства, ускоряющие дальнейший прогресс человечества.

...В прошлом веке в Швеции жил очень богатый предприниматель и инженер Альфред Нобель, тот самый, который изобрел динамит. В своем завещании Нобель распорядился употребить свое огромное состояние на присуждение премий ученым, сделавшим важные научные открытия. С тех пор Шведская академия наук ежегодно присуждает Нобелевские премии за наиболее интересные и важные научные работы. Такую премию когда-то получили всем известные ученые Рентген, Эйнштейн, Фредерик Жолио-Кюри; русские ученые Павлов, Мечников. В 1958 году за открытие и толкование эффекта Черенкова — Вавилова И. Е. Тамм, И. М. Франк и П. А. Черенков были награждены этой премией. С. И. Вавилова не было в их числе, ибо Нобелевские премии не присуждаются посмертно.

ГЛАВА 4

СТРАННЫЙ АТТРАКТОР

Если смотреть прямо, виден лишь хаос. Но за ним просматривается закон.

В. Шекспир

От хаоса к порядку

Порядок и хаос. Среди понятий, выработанных человечеством, нет, пожалуй, двух более противоположных, более фундаментальных, изначальных. Каждому ясно содержание

этим слов, вряд ли нужно объяснять, что есть порядок, а что — хаос. Скорее, наоборот. Ссылаясь на них, можно объяснить значение и содержание других понятий. Например, что такой закон? В общественной жизни это правила поведения. Соблюдение их помогает поддерживать порядок во взаимоотношениях между людьми. Это может быть закон, зафиксированный в своде законов, или обычай, освященный вековым опытом. Нарушение закона или обычая ведет к хаосу.

В науке закон — это словесное математическое описание процесса или явления. Закон — описанный порядок. Он поясняет, какое следствие можно ожидать после определенной причины. Если некое бытие по непонятной причине ведет не к одному определенному, а к одному из двух или нескольких следствий, мы склонны видеть здесь отсутствие порядка, неполный порядок, шаг к хаосу. Такая ситуация сигнализирует: наши знания не полны, не выявлены некие, еще скрытые, причины, нарушающие порядок.

Человек в глубокой древности уяснил себе, что есть порядок, а что хаос. Брошенный камень всегда падает на землю. Таков порядок. Чем сильнее бросок, тем дальше летит камень. Таков порядок. Но не существует порядка в том, где и когда появится дичь. За ночью всегда следует день, а за днем — ночь. Но никто не знает, когда пойдет дождь. Впрочем, опытный охотник знает место и время более добычливой охоты и каждому ясно, что осенью дожди идут чаще, чем летом. Значит, и здесь скрыты какие-то менее жесткие закономерности. Незрелый и слабый разум первобытного человека, конечно, не мог разобраться в цепи причин и следствий, и он относил все это за счет высших сил.

В темной глубине веков, едва возвысившись над остальными животными, люди сами ввели в свою среду первые элементы порядка. Это проявилось в расслоении людей по признакам, не имевшим почти ничего общего с естественным различием родителей и детей. Жизненная необходимость показала, что охота становится более добычливой, если среди охотников выделяется вожак, предводитель, превосходящий других слухом и зрением, опытом и сноровкой. Защита от врагов, захват и оборона добычливых угодий удавались лучше, если кто-либо координировал общие действия. Впрочем, вожаки выделяются и среди стадных животных, и среди хищников, охотящихся стаями.

Но наряду с вождями, выделявшимися мудростью, опытом и сноровкой, с военачальниками, отличавшимися силой, бесстрашием и умением владеть дубиной и копьем, обособились те, кто хитростью и лукавством поставил себя между людьми и богами. Провозгласив свою исключительность, они объявили себя слугами богов, требуя чтобы остальные заботились о них. И, достигнув этой цели, употребили свободное время на то, чтобы укрепить и расширить свое привилегированное положение, свою власть над людьми. Они наблюдали и запоминали увиденное, чтобы поражать соплеменников своими знаниями тщательно охраняя их источники.

Потребность в сохранении и охране знаний и наличие свободного времени делают весьма вероятным, что письменность изобрели именно жрецы. Недаром во времена, отделенные от нас всего тысячами лет, разглашение тайн жреческого сословия каралось у некоторых народов смертью.

Проходят века... Человек учится замечать признаки порядка и там, где раньше ему виделся только хаос. Например, разлив Нила следует за первым появлением звезды, которую мы теперь знаем под названием Сириус. Приглядываясь к звездам, человек замечает, что на небе на фоне общего порядка, на фоне согласованного движения бесчисленного множества звезд имеются и нарушители порядка. Некоторые из них — правда медленно, медленно, но неуклонно — перемещаются относительно других. Две из них ненадолго появляются то утром, то вечером — перед утренней зарей или после вечерней. Еще три медленно перемещаются между остальными звездами, иногда останавливаясь и описывая петли.

К этому времени люди не только создали себе богов и посвятили им эти блуждающие звезды, но они, вернее, некоторые из них стремились усмотреть порядок даже в том, что, по-видимости, нарушало порядок. И те, кому удалось такое, выделялись среди людей, приближались к богам. Такие гении не обязательно были царями или жрецами. У Гомера мы

читаем: «...свинопас богоравный».

Те кто посвятил себя поиску порядка в окружающем мире и отдавал этому свои силы и время не с целью эксплуатации себе подобных, находили удовлетворение не только в приобретении знаний, но и в передаче этих знаний другим. Углубленные в свои занятия, они довольствовались малым. Впрочем, некоторые из них жили не только в почете, но и в достатке.

Никто и никогда не узнает, кто и когда изобрел письменность. Вероятно, к этому независимо пришли различные народы. Письменность стала коллективной памятью, более точной и более емкой, чем изустные сказания. Она донесла до нас многое из того, чем и как жили наши далекие предки.

Так мы узнали, что математика, родившись из практической потребности людей, затем обгоняла эти потребности, развиваясь за счет извечного стремления людей к знанию. Арифметика, несомненно, возникла из потребностей меновой, а затем, денежной торговли. Но сколь ни развивалась реальная потребность в счете, она никогда не могла угнаться за возможностями арифметики, а Архимед в одном из своих сочинений доказал, что арифметика не знает предела, что можно сосчитать количество песчинок даже в том случае, если бы они заполнили собой весь мир. Сосчитать и записать получившееся число при помощи символов — чисел, знакомых людям уже более трех тысяч лет.

Но наряду с этим могуществом арифметика скрывала в себе и поразительную слабость. Именно скрывала, ибо задолго до рождения Архимеда Пифагор обнаружил и приказал своим ученикам хранить в тайне удивительный факт: не существует числа, при помощи которого можно записать длину диагонали квадрата, если длина его стороны равна единице. Прошли века, прежде чем люди узнали что такое число все же существует. Но для этого пришлось создать новый класс чисел, не известных античным математикам, класс иррациональных чисел. Люди и сейчас не знают того, как распределены среди других чисел те которые называют простыми. Простыми, ибо они не делятся ни на одно число, кроме единицы и самого себя. Не является ли это хаосом, скрытым в глубине порядка описываемого числами?

Подобную слабость содержала и геометрия, доведенная Евклидом до такого совершенства, что его книга служила учебником еще в начале нашего века, а содержание евклидовой геометрии останется справедливым до тех пор, пока сохранится наша цивилизация. Будет верным, несмотря на появление неевклидовых геометрий, ибо каждая из них применима в своем случае, поэтому они не противоречат одна другой. Но, несмотря на свою непогрешимость, все они — и геометрия Евклида, и геометрия Римана, и геометрия Лобачевского — пасуют перед некоторыми «простенькими» задачами. Они не показывают, как при помощи циркуля и линейки построить квадрат, площадь которого равна площади определенного круга, или как при помощи этих же приборов разделить на три равные части угол, образованный двумя прямыми, пересекающимися между собой, если этот угол не прямой. Сколько математиков потратили на это годы — но решения не нашли!

Эллины относили геометрию к разряду высших наук. Арифметику и даже физику и механику — к низшим наукам, ибо они служили не совершенствованию духа, а «пошлomu ремеслу». Геометрии с ее кристальной ясностью евклидовых постулатов и теорем они прощали и ее происхождение, и ее применение для раздела земельных участков. Без геометрии порядок землевладения превратился бы в хаос и бесконечные тяжбы.

Много поколений древних мудрецов стремились обнаружить порядок в небесных явлениях. Их завораживало вечное и неизменное вращение вокруг Земли множества постоянно пребывающих в покое относительно друга. Большинство философов объясняло такой безупречный порядок тем, что звезды прикреплены к незримой сфере, вращающейся вокруг Земли с безупречным постоянством. Лишь Аристарх думал иначе: мы видели бы тоже самое, если бы небесная сфера была неподвижной, вращалась Земля. Но ему не верили, ибо никто не ощущал вращения Земли, а странная гипотеза Аристарха оставляла без объяснения очевидные движения планет. Напротив, если принять, что Земля неподвижна, а вращается небесная сфера, естественно предположить, что каждая планета прикреплена к своей

незримой вращающейся сфере. Оставался «пустяк» — надо было лишь догадаться, как при помощи добавочных незримых вращающихся сфер объяснить запутанные движения планет. Особого успеха в этом достиг выдающийся астроном древности Птолемей. Его сложная система с поразительной точностью выявляла порядок, царствующий в небесах, позволяла предсказывать затмения Солнца и Луны, затмения звезд и планет Луной, сближения и расхождения планет между собой и их замысловатые перемещения между звездами, прикрепленными к внешней сфере.

Система Птолемея просуществовала века. Церковь опиралась на ее безошибочность и поддерживала своим авторитетом. Ведь Иисус Навин, учили отцы церкви, сказал «остановись» Солнцу, а не Земле.

Тихая революция

Коперник усомнился в истинности системы Птолемея, потому что она слишком сложна и громоздка. Он, ученый каноник и прилежный наблюдатель неба, усомнился в том, что бог избрал такой странный способ утвердить порядок, который он мог создать гораздо проще. Многие годы в глубокой тайне Коперник искал путь, который, его мнению, был бы достоин премудрости небесного отца. Втайне потому, что он, служитель божий, знал разницу между мудростью всевышнего и догматами церкви. Это был странный бунтовщик, он бунтовал во имя бога, веря в то, что порядок, созданный богом, должен быть простым вопреки догматам церкви.

Лишь многократно проверив себя и убедившись в том, что сконструированная им простая система дает все, что можно получить из громоздкой системы Птолемея, он решает посвятить в свою тайну одного из своих учеников. Невозможно узнать, не сыграло ли роль в его выборе то, что этот ученик не католик, а протестант. Общение с протестантом само по себе прегрешение против католической церкви, служителем которой был Коперник. Но еще больший грех сомнение в догматах. Сообщить об этом протестанту казалось более безопасным. Ведь он не донесет инквизиции.

Сила науки, ее могущество зиждется на том, что ученый, настоящий ученый, испытывает непреодолимую потребность поделиться своими результатами, своим вновь обретенным знанием с ученым, способным понять и передать свет нового знания другим.

Этот ученик понял, и восхитился, и страстно убеждал Коперника оповестить ученый мир об истинном устройстве мироздания, открывшемся учителю во всем своем простом порядке.

Но Коперник не мог решиться. Лишь после долгих уговоров он согласился ознакомить узкий круг ученых мужей с кратким изложением полученных результатов. Робкий, осторожный шаг. Затем он решился. Что же толкнуло его на подвиг? И огромная настойчивость ученика, и то, что первая попытка прошла благополучно, и то, что здоровье ухудшалось и жизнь подходила к концу, и, может быть, надежда, что бог не оставит того, кто открыл миру истину. Так или иначе, он решился. И послал свою рукопись издателю. И был вознагражден. На смертном одре он увидел труд своей жизни напечатанным.

Д в это же время другой подвижник, его звали Тихо Браге, избравший своим божеством точность, искал порядок в движениях планет, заказывая все более совершенные приборы, отыскивая, устраняя и учитывая погрешности этих приборов.

Узнав о системе Коперника, но, не обладая скромным мужеством Коперника, Тихо Браге сделал, в угоду церкви, шаг назад — придумал систему, частично воспроизводившую систему Коперника, но сохранявшую неподвижность Земли. Эта система выглядела так: вокруг неподвижной Земли совершает суточное вращение сфера. Она несет на себе звезды, неподвижно укрепленные на ней; между Землей и сферой неподвижных звезд движется Солнце, затрачивая на каждый оборот вокруг Земли ровно год. Вокруг Солнца, следуя Копернику, вращаются пять планет.

Тихо Браге не дал себе труда придумать многочисленные сферы, способные, по

примеру птолемеевых, обеспечить все согласованные движения этого механизма. Он, вероятно, сам не верил в то, что это хитросплетение сможет заменить кристальную ясность системы Коперника.

Лишь после смерти Тихо Браге его сотрудник Кеплер обнаружил, что простота системы Коперника маскирует какой-то скрытый в ней порок. Система Коперника позволяла вычислять моменты затмений и моменты сближения небесных тел гораздо проще, чем система Птолемея. Проще, но менее точно. Модель, мысленно построенная Птолемеем и пущенная им в ход много веков до явлений, зафиксированных Тихо Браге в точнейших таблицах, работала точнее, чем модель, придуманная Коперником.

В самом начале семнадцатого века, семнадцатилетней Тихо Браге наблюдал редкое событие — сближение планет Юпитера и Сатурна. Вычисление момента этого события по системе Коперника дало втрое большую ошибку чем вычисление по системе Птолемея! Было над чем задуматься.

Сухие цифры грозили разрушить новый порядок, усмотренный Коперником, заставить скромных вычислителей, каким считал себя Кеплер, вновь обречь себя изнурительным вычислениям, основанным на системе Птолемея.

Кеплер был настоящим ученым, не менее самоотверженным и более бесстрашным, чем Коперник. Ведь Коперник сравнивал свои вычисления со своими наблюдениями. И все сходилось. И это давало ему уверенность в том, что его система правильно отображает порядок, существующий в извечном движении планет, одной из которых он объявил Землю.

Кеплер понимал, почему у Коперника все сходилось. Он знал, что гений мысли измерял неточно. Так началась новая драма. Драма одинокого актера, драма, в которой декорациями служило звездное небо, а зрителей не было. Но больной, одинокий ученый знал, что трудится не для себя, а для истины, для человечества.

Он шел тернистым путем проб и ошибок. Догадка, затем невообразимо трудные и долгие вычисления... Результаты не сходятся с таблицами Тихо Браге. А этим таблицам следовало верить больше, чем библии, ибо божеством Тихо была точность. Еще одна попытка, еще дни и ночи, отданные вычислениям, еще одно разочарование.

И наконец озарение. Кеплер понял, что Коперник, отвергнув Птолемея, не порвал с Платоном. Великий греческий философ считал идеальной фигурой круг и учил, что небесные тела совершают идеальные движения, двигаясь по кругам. Кеплер нашел в себе силы отбросить не только догматы церкви, но и вековой догмат Платона. Он решил проверить, не движутся ли планеты по иным орбитам, например по эллипсам? И начал новые, еще более громоздкие вычисления. И был вознагражден. Все сошлось!

Система Коперника, идея Коперника была спасена. Ведь главное у Коперника не окружности. Главное — ответ на кардинальные вопросы: что неподвижно, что движется? Теперь все ясно. Земля и планеты движутся по эллипсам. Солнце неподвижно. Там, где находится центр Солнца, располагаются фокусы всех эллипсов, по которым движутся планеты и в их числе Земля. Пусть вычисления стали сложнее, но порядок восстановлен. Природа, воплощенная наблюдениями Тихо Браге, подтверждает: вычисления стали более громоздкими, но теперь они правильны.

Более того, впервые за многовековую историю астрономии в результате безбрежных вычислений Кеплеру удалось воплотить порядок, царствующий в природе, в удивительно простые математические формулы — в три закона, из которых теперь, когда они открыты, как бы вытекает во всем своем величии система Коперника. Теперь, когда открыты эти чудесные законы, вычисления вновь поразительно упростились!

Простота. Не является ли она признаком правильности?

В это время другой гений, за хребтами Альп, в солнечной Италии, совершил еще одну революцию в астрономии. Он изготовил зрительную трубу — впрочем, зрительные трубы до него делали и другие. Но он направил ее не на земные предметы, а в небо. И увидел множество звезд, ранее незримых, и горы на Луне, отбрасывающие тени, и четыре слабеньких звездочки, перемещающиеся вблизи планеты Юпитер. Перемещающиеся с

поразительным постоянством, каждая по-своему. Галилео Галилей — таково его имя — показывал эти звездочки всем желающим и объяснял, что это луны Юпитера, его спутники. Что это видимая воочию система Коперника, ее миниатюрный вариант. И не только показывал и объяснял друзьям и знакомым, но осмелился написать об этом, издать книгу, в которой на основе наблюдений, доступных каждому обосновывал систему Коперника, уже проклятую к тому времени церковью и запрещенную под страхом страшных кар.

И кары не заставили себя ждать. Церковь безжалостно обрушила свою десницу на ученого, успевшего к тому времени не только вывести на свет детище Коперника, но проложить новый путь Науке, порвав с догмами Аристотеля, канонизированными церковью и поддержанными ее авторитетом.

Но дело было сделано. Путь проложен. Толчок дан. Движение началось, и остановить его уже оказалось невозможным.

В туманной Англии другой гений принял эстафету, выскользнувшую из руки Галилея. В юности он поставил перед собой цель и шел к ней до глубокой старости. Его цель — сделать физику такой же ясной и безупречной, как геометрия Евклида. Он понимал это так: обнаруживать в природе порядок и формулировать его в форме принципов; облекать эти принципы в математические формулы — законы; извлекать из этих законов новые, еще не известные следствия и подтверждать их истинность специально поставленными опытами. Только те, сформулированные человеком, законы являются законами природы, считал он, которые способны выявлять в природе явления, не известные ранее.

Выполняя поставленную перед собой программу, Исаак Ньютон создал на основе опытов Галилея и своих наблюдений три закона движения, а на основе трех законов Кеплера сформулировал четвертый закон — закон тяготения, связавший небесные движения с земными.

Для того чтобы извлекать следствия из этих четырех законов Ньютону пришлось создать новую математику, исчисление бесконечно малых величин, то, что мы теперь называем дифференциальным и интегральным исчислением.

Этим Ньютон провел черту между наукой, существовавшей до него, и тем, что началось его работами. Создал то, что впоследствии стало классической физикой.

Научная программа Ньютона содержала требование не выходить за пределы принципов, основанных на наблюдении природы и на специально поставленных опытах. Он сформулировал это требование коротко, афористично: «Гипотез не измышляю». Вся механика Ньютона удовлетворяет этому требованию. Оно может быть сформулировано и так: нужно понять, как происходят явления природы, нужно описать их при помощи математики, но не следует ставить вопросов о том, почему они происходят так, а не иначе.

Ньютон установил порядок, управляющий взаимным притяжением тел: сила тяготения, действующая между двумя телами, убывает в той мере, в которой увеличивается квадрат расстояния между ними, точнее — между их центрами тяжести. Ньютон не знал, почему так происходит. Это беспокоило его. В конце жизни он писал о своих сомнениях. Но, считал он, основная задача науки выводить законы и вычислять следствия. А это возможно и без знания глубоких причин.

Ньютон, как никто другой, понимал, сколь глубоко прячет природа свои тайны. И он считал, что не следует останавливаться в бессилии перед вопросом «почему», если можно ответить на вопрос «как». Ответить и идти дальше в надежде на то, что позже можно будет ответить и на вопрос «почему». Ответить по существу, а не измышлять гипотезы. Ибо, измыслив одну гипотезу, неизбежно придется измышлять и вторую, и третью, уходя от порядка, существующего в природе, так далеко, что уже нельзя будет находить верные ответы на вопрос «как». Нельзя будет формулировать законы и вычислять следствия.

Ньютон дал науке больше, чем кто-либо иной до него и после него, вплоть до наших дней. К нему не относятся слова Стефана Цвейга, смысл которых сводится к тому что боги не дарят смертному более одного великого деяния. Ньютону было дано совершить два. Он создал основы механики вместе с необходимой для этого математикой. Он заложил основы

оптики.

Но уже здесь боги сделали все, чтобы он не нарушил их запрета. Они заставили Ньютона изменить гордому девизу. Создавая оптику, он не смог обойтись без гипотез. И боги, толкнув его на этот путь, не преминули наказать за это. Его основная гипотеза — предположение о том, что свет состоит из частиц, — оказалась сметенной развитием волновой теории света.

Если требуется сформулировать в одной фразе итог всему, сделанному Ньютоном, то ее можно изложить так: он установил, что в природе существует порядок и что человек может познать этот порядок.

Порядок в случайности

Когда Ньютон создал новую математику, приспособленную для того, чтобы описывать физические процессы, развивающиеся во времени, возникло ощущение, будто математике суждено быть служанкой физики. Но математика немедленно восстановила свое истинное положение — положение царицы наук. Она поразительно быстро росла и развивалась, черпая стимулы развития в себе самой. Она ставила и решала вопросы, недоступные физике и другим конкретным наукам. Она искала и находила задачи в себе и вокруг себя. Находила их и решала, хотя некоторые из этих задач выглядели неразрешимыми.

Такие задачи обнаруживались не только в науке, не в жизненно важных областях человеческого существования, но и вне их, например в играх. В том числе азартных. В карточных играх, игре в кости, в лотереях тотализаторах, в рулетке и подбрасывании простой монетки.

Поколения игроков мечтали создать систему, способную обеспечить верный выигрыш. Лишь желание создать вечный двигатель может сравниться по силе страсти со стремлением к системе, открывающей путь к богатству без затраты труда.

Мало кто из великих писателей не касался этой темы. Бальзак писал в «Шагреневой коже»: «Поймете ли вы, до какой степени одержим азартом человек, нетерпеливо ожидающий открытия на пороге игорного зала?» И всегда, как и в жизни, синяя птица мечты ускользала, а в выигрыше оставался только банкомет, только владелец рулетки, только рыночный игрок в три листика...

Математики не могли пройти мимо этой увлекательной темы. Кто, как не они, властители цифр, имели надежду на успех! Все знают, что невозможно предсказать, какой стороной вверх упадет подброшенная монета. Все знают, что шансы обеих сторон одинаковы. Но каждый надеется, что в игре с равными шансами ему повезет, его счастье перетянет. Почему же каждый, кто позволит себя увлечь, кто не сможет остановиться, неизбежно проигрывает? Почему в выигрыше остается тот, кто бросает монетку?

Почему неизменно наживаются владельцы игорных домов, владельцы новомодных игровых автоматов, организаторы лотерей и собственники страховых компаний?

Как ни старайся физик изучить тайну полета монеты или игровой кости, устройство рулетки и лотерейного колеса, он не найдет ничего иного, кроме того, что в дом опыта любой исход имеет равный шанс с другими. Математик скажет: в единичном опыте любой исход равновероятен. И будет прав, потому что математики, в надежде дойти до сути дела создали новую науку — теорию вероятностей, а равенство шансов при игре в монетку является и основой и следствием этой теории.

Теория вероятностей, после того как была создана, говорит: если какой-либо процесс может иметь два исхода и оба имеют равный шанс, равную вероятность оказаться реализованными, то после многих попыток, например после тысячи попыток, почти наверняка каждый из них реализуется по 500 раз. Реже один из них состоится 501 раз, а другой 499 раз. Причем предсказать, какой исход перевесит, невозможно. А вероятность сильных отклонений от равенства убывает с ошеломляющей быстротой.

Но теория вероятностей говорит и о большем. Например, подбросив монетку один раз,

можно с равной вероятностью ожидать любого исхода. Но как часто можно ожидать одинакового исхода, бросив монетку два раза подряд? Это важно знать азартному игроку, надеющемуся на свое счастье. Пусть вероятность угадать в единичном испытании по-прежнему равна $1/2$. Как узнать вероятность того, что удастся угадать дважды подряд? Для этого нужно умножить между собой две единичные вероятности. Итак, вероятность угадать два раза подряд равна всего $1/4$.

Не трудно сосчитать, как велика вероятность выиграть в кости десятирублевую бумажку, которую владелец костей кладет перед игроком, протягивая ему стаканчик с двумя игральными костями и предлагая за один рубль угадать сумму очков, выбросив одновременно обе кости. Мало кто из искателей счастья понимает, что его грабят, предлагая уплатить рубль за один шанс из восемнадцати. Но владелец костей знает из опыта, без всяких расчетов, что в среднем он получает по восемнадцать рублей за каждую из своих десятков.

Теория игр составляет лишь малую область, охватываемую теорией вероятностей, которая в силу саморазвития науки послужила фундаментом мощного здания математической статистики. Медики грустно шутят: медицина превратилась из искусства в науку, когда появилась возможность изучать статистику смертности. И действительно: бесстрастная статистика дала возможность беспристрастно оценивать эффективность лекарств и методов лечения на основе хаотического множества не связанных между собой случаев выздоровления и смерти.

Математическая статистика оказалась хорошо развитой, а ее методы достаточно надежными задолго до того, как физики поняли, что она необходима и им.

В начале последующей истории стоит имя французского инженера Сади Карно. Озабоченный прожорливостью паровых машин, он задумался над тем, как добиться их большей производительности. Чтобы они производили по возможности больше механической работы при затрате определенного количества топлива. И, исходя из ошибочной, но наглядной теории теплорода, нашел правильное решение. Единственно правильное решение: пар на входе машины должен быть как можно горячее, а на выходе — возможно холоднее. Эта разность температур и определяет эффективность работы паровой машины. Превзойти предел эффективности машины, определяемый максимальной разностью температур, невозможно. Можно лишь ухудшить ее работу, если допустить утечку пара или потерю тепла, не сумев уменьшить до предела трение, поглощающее часть работы, совершаемой машиной.

Перед своей ранней смертью, вызванной соединенными усилиями скарлатины и холеры, Карно успел перенести свои выводы с зыбкой почвы теплорода на основу новорожденной кинетической теории теплоты.

Кинетическую теорию теплоты, связавшую энергию с незримыми движениями молекул, создавали и совершенствовали многие выдающиеся ученые. Самым замечательным из них был англичанин Джеймс Максвелл тот, кому — после Ньютона — боги разрешили совершить два великих деяния. Вторым из них было создание электродинамики, ставшей, наравне с механикой Ньютона, одним из двух фундаментов современной науки.

В нашей истории нас интересует первое великое деяние Максвелла — создание статистической физики. Это область физики, основанная на систематическом применении математической статистики и механики Ньютона к изучению явлений природы. Она утверждает: движения индивидуальной молекулы можно изучать, сравнив ее с бильярдным шаром. Такая модель полностью подчиняется законам механики Ньютона. При помощи математической статистики можно, таким образом, вычислять свойства и поведение газов, образованных множеством молекул.

К удивлению маститых физиков, при этом, как чертики из коробочки, из невообразимого хаоса беспорядочно кишачих молекул возникали законы поведения газов, хорошо известные экспериментаторам.

Оказалось возможным при помощи математической статистики получить величины

давления и вязкости газов, связать их между собой и с температурой газа. Таким путем, несмотря на хаотические движения молекул, можно с большой точностью предвидеть поведение газов, вычислить изменение давления при изменении объема и температуры, словом, произвести все расчеты, связанные с явлениями, в которых участвуют газы. Это лишь один из немногих примеров, в которых после математической обработки хаос оборачивается порядком.

Ученые пришли к мысли: не следует пытаться описывать движение каждой отдельной молекулы при помощи всемогущих законов Ньютона, а потом пытаться совместно решать миллиарды миллиардов уравнений, возникающих на этом пути.

Дело не в том, что это привело бы к ошибкам, — просто такой путь непреодолимо труден и долог. Необходимость применения методов статистики возникает не потому, что в газе царствует хаос, — увы, жизнь человеческая слишком коротка для того, чтобы выявить скрытый за этим хаосом безупречный порядок, воплощенный в законах Ньютона и уравнениях механики.

Так возникло убеждение: в природе все подчиняется точным закономерностям, природе чужд истинный хаос. Это убеждение проникло в основы науки, в механику, а затем и в электродинамику. Это случилось после того, как великий голландец Хендрик Лоренц развил максвелловскую электродинамику, связав электромагнитные поля с электрическими зарядами, и создал электронную теорию строения вещества.

От порядка к хаосу

Прежде чем двигаться дальше, нам придется отойти немного назад, чтобы проследить, как работа Карно дала толчок развитию новой науки. Первоначально эта наука возникла потому, что люди, жившие в окружении множества различных сил, стремились выяснить связи, существующие между этими силами. Одни старались создать вечный двигатель, другие хотели узнать, почему все, ставшие на этот путь, терпели неудачу. Постепенно прояснились процессы, сопровождающие превращение одних сил в другие. И к середине прошлого века коллективными усилиями было выработано обобщающее понятие «энергия». Словно солнце выглянуло из-за туч! Как же раньше ученые не замечали, что все многочисленные силы — лишь различные воплощения энергии! Как не понимали, что все виды энергии могут превращаться одна в другую! Наконец наступил замечательный день — был найден закон управляющий такими превращениями. Закон сохранения энергии.

Этот закон предвидел еще Ломоносов. Окончательно сформулировал его немецкий физик Р. Майер и подтвердил справедливость многочисленными опытами. Существенный вклад в осознание закона сохранения энергии сделал Дж. Джоуль. Мы пишем «подтвердил», «осознание», потому что невозможно доказать закон сохранения энергии, исходя из более простых принципов. Он сам принадлежит к немногим наиболее фундаментальным принципам, извлеченным из наблюдения природы и из специальных опытов в полном соответствии с научным методом Ньютона.

Закон сохранения энергии фиксирует, что энергия не может возникнуть из ничего и не может исчезнуть. Она может лишь превращаться из одной формы в другую, переходить от одного тела к другому и обратно. Для любых двух видов энергии ученые обнаружили правила взаимного превращения, установили эквиваленты. Один эквивалент связывает переход механической энергии в электрическую и обратно, другой связывает электрическую энергию с энергией света — и так для любых видов энергии. Любых, за исключением одного вида.

И тут-то ученых подстерегала великая тайна природы. Хаос приоткрыл свое истинное лицо. Казалось бы, непреложная истина — всякую энергию можно полностью превратить в тепловую энергию. Известен механический эквивалент тепла, электрический эквивалент тепла и многие другие. Но... И тут начинаются сюрпризы: все они справедливы только для перехода в одну сторону, из нетепловой энергии в тепловую. Для обратного перехода —

другие правила игры, другие удивительные «эквиваленты».

Их странность состоит в том, что они не являются постоянными величинами. Все зависит от условий опыта, точнее, от разности температур в начале и в конце эксперимента.

Именно это открыл Карно своими мысленными опытами над паровыми машинами. Перед каждым эквивалентом, определяющим количественную связь затраченной тепловой энергии с количеством полученной энергии другого вида, стоит универсальный множитель. Он равен разности начальной температуры процесса и его конечной температуры, разделенной на величину начальной температуры (нужно добавить, что температура при этом должна быть измерена от абсолютного нуля, иначе говоря — по шкале Кельвина). Существенно, что этот множитель всегда меньше единицы.

Заслуга Карно состоит в том, что он нашел этот закон для частного случая паровой машины, для случая превращения тепловой энергии в механическую. Но он не осознал, что этот закон имеет всеобщее применение. Он дал толчок мыслям своих последователей, не подозревая, какую драму он им уготовил.

Первым, кто догадался о страшной судьбе, обещанной миру законом, открытым Карно, был Р. Клаузиус, придавший закону Карно строгую математическую форму и указавший на универсальность этого закона, столь важного, что за ним утвердилось название Второго закона термодинамики или Второе начало термодинамики. «Второй», «Второе», потому что закон (начало) сохранения энергии был уже ранее признан Первым законом или Первым началом термодинамики.

Клаузиус обратил внимание своих коллег на то, что тепловая энергия обладает уникальным свойством самостоятельно перетекать только от более горячих тел к менее горячим. Самопроизвольно переходить в обратном направлении она не способна. Он установил, что любой вид энергии может без всякого остатка превратиться в тепловую энергию. Обратный переход возможен только частично. Часть тепловой энергии при этом навек остается тепловой энергией и, переходя от нагретых тел ко все более холодным, рассеется в мировом пространстве.

Такова, в соответствии со Вторым началом термодинамики, судьба Вселенной: все имеющиеся в ней запасы энергии, энергии любого вида, со временем превратятся в тепловую энергию. Мир будет постепенно остывать. Он будет остывать до тех пор, пока все тела в нем не охладятся до абсолютного нуля. После этого все движения, все процессы прекратятся. И ничто никогда не начнется вновь.

«Оцепенение» — пожалуй, самое подходящее слово для передачи настроения, воцарившегося в среде ученых. Правда, нашлись такие, кто воспринял это спокойно. Ведь и раньше знали, что, для того чтобы создать из хаоса порядок, нужно затратить энергию. Порядок превращается в хаос без всякой затраты энергии. При этом даже высвобождается энергия, та самая, что была затрачена ранее на достижение порядка. Примеры долго искать не надо. Чтобы превратить кучу кирпича в здание, надо затратить энергию. Без этого не поднять кирпичи на соответствующую высоту, не уложить их в требуемом порядке. Но пройдет время, и здание само по себе превратится в кучу кирпича. Еще пример? Чтобы превратить железную руду в металл, требуется огромная затрата энергии. А потом? Металл окисляется, превращается в ржавчину, в чистую руду и при этом выделяет тепло. Капля точит камень, делает из него песок, но она никогда не превратит этот песок обратно в гранит, разве что в песчаник.

Хорошо, рассуждали философы, что термодинамика объяснила нам, почему так происходит. Любое упорядочение требует затрат энергии, любой шаг от порядка к хаосу приводит к превращению части энергии в тепло, к рассеянию этого тепла. Бороться со Вторым началом термодинамики невозможно. Нужно учитывать его и по возможности уменьшать неизбежные потери.

Многие ученые, узнав о тепловой смерти Вселенной, утешали себя тем, что это наступит очень и очень не скоро. Что наши далекие потомки погибнут много раньше — когда остынет Солнце.

Они говорили: Второе начало — величайший закон природы, наконец-то он объяснил, почему время течет только в одну сторону — от прошлого к будущему. Пусть в этом будущем тепловая смерть, но мы и без того знаем, что все живое развивается от рождения к смерти. Се ля ви, вздыхали они, — такова жизнь. Такова воля божья, констатировали третьи, он создал мир и уготовил ему гибель...

Но не все физики предавались отчаянию, не все довольствовались самоутешением (нефизики — те просто ни о чем не подозревали. Газеты и журналы тех времен не интересовались наукой).

Были и такие ученые, которые указывали на непримиримое противоречие между термодинамикой и механикой Ньютона. Термодинамика (что означает — наука о движении теплоты) утверждает, что тепловые процессы идут в одну сторону, в сторону охлаждения, от прошлого в будущее. Законы же Ньютона, уравнения, основанные на этих законах, таковы, что сохраняют свою силу при любом направлении течения времени. Они позволяют вычислять не только будущее, но и прошедшее. Зная, когда поезд пришел в пункт А и с какой скоростью он двигался на каждом участке пути, сколько времени он стоял на станциях, нетрудно вычислить, когда он выехал из пункта Б.

Почему механика разрешает углубляться в прошлое, а термодинамика запрещает это? — спрашивали они. И почему все же нельзя вернуться в прошлое? В этом следует разобраться. Что же более верно отображает природу термодинамика или механика?

То, что механика, вопреки опыту, допускает обращение времени, тревожило самого Ньютона. Но верный своему девизу, он не создавал гипотез для объяснения этой тайны. А опыт не давал даже намека на какую-либо скрытую причину. В конце жизни Ньютон сослался на бога. Бог подвинул Ньютона на создание механики и ее уравнений. Весь мир подчиняется этим уравнениям. Но одних уравнений мало. Для того чтобы вычислять, необходимо еще знать начальные условия. Знать, с чего все началось. А начальные условия задал бог, и изменить их невозможно. Поэтому все движется от начала в будущее. До начала не было ничего. Так рассуждал в старости уставший Ньютон.

Не все соглашались с этим. Ученые, как и сам Ньютон в годы, когда был полон сил, крупные ученые — теоретики и экспериментаторы, в своих лабораториях и за своими письменными столами, — выступали и выступают как материалисты. Одни стихийно, неосознанно. Другие сознательно. Богу — божье, считают те из них, кто не порвал с религией, но науке — научное.

Ссылка на начальные условия ненаучна.

Ссылка на начальные условия может стать научной, считали некоторые, если подойти к ней с позиции науки.

Дальше всех по этому пути продвинулся Людвиг Больцман, крупнейший физик-материалист прошлого века. Сознательный и убежденный материалист.

Он доказывал: невозможно задать начальные условия абсолютно точно, а значит, невозможно и получить абсолютно точные решения уравнения. А исходя из неточных решений и изменив в уравнениях Ньютона течение времени, возможно прийти к исходным начальным условиям. Решения, полученные таким способом для нулевого момента времени, будут отличаться от тех начальных условий, которые были положены в основу решений. Так, повернув к прошлому, мы придем в будущее.

На деле, пояснял Больцман, ни один механический процесс нельзя описать совершенно точными уравнениями. Положите в лотерейное колесо слой белых шаров, а на него слой черных. Теперь вращайте колесо. Шары перемешаются. Бесполезно надеяться на то, что, повернув колесо обратно точно столько раз и точно с такой скоростью, с какой мы вращали его вперед, мы добьемся того, что из хаоса восстановится порядок, что шары снова улягутся слоями, как было вначале. Мельчайшие дефекты шаров и поверхности колеса не были учтены в уравнениях. Думая, что мы ведем опыт в обратном направлении, мы продолжаем идти вперед.

Значит ли это, что Больцман примирил термодинамику с механикой Ньютона, что их

можно объединить или получить одну из другой? Отнюдь. Для термодинамики движение от прошлого к будущему имеет принципиальное значение. Запрет обратного движения от будущего к прошедшему является для термодинамики безусловным и нерушимым. Таково свойство природы. Это нужно принять как непреложный факт. Но объяснить, почему это так, оставаясь в границах термодинамики, невозможно.

Для механики движение во времени остается обратимым, во всяком случае, в принципе. Движение лишь в одном направлении следует из практической невозможности воспроизвести еще раз условия, существовавшие в начальный момент, в начале пути в будущее.

Для механики в принципе допустимо возвращение от хаоса к порядку. Лишь неучитываемые случайности мешают достичь этого без нарушения закона сохранения энергии, играющего в механике столь же важную роль, как в термодинамике.

Для термодинамики возвращение от хаоса к порядку является абсолютно запретным. Этот запрет воплощен во Втором начале термодинамики, в постулате, никак не связанном с законами механики.

Триединство

Теперь мы должны перешагнуть через четверть века, минуя открытие квантовых скачков, совершенное Планком, создание первого варианта квантовой механики, порожденной соединенными усилиями Эйнштейна и Бора, создание теории относительности, поставившее Эйнштейна в глазах людей рядом с Ньютоном.

Мы совершим скачок в начало двадцатых годов двадцатого века, когда три молодых гения создали то, что сперва называли новой квантовой механикой, то, что затем стало квантовой физикой, породило квантовую химию, вторглось в астрофизику и биологию, вырвалось из микромира в наш обычный мир с его металлами и диэлектриками, полупроводниками и сверхпроводимостью, привело к созданию новой техники и, увы, к появлению ядерного оружия.

Бакалавр по разделу истории Луи де Бройль начал свой путь в физику с диссертации, поразившей научный мир своим новаторством и блеском. В ней он вывернул наизнанку идею Эйнштейна, увязавшего в 1905 году световые волны с квантами света, частицами света, позже получившими наименование фотонов. Де Бройль связал микрочастицы (он рассматривал электроны) с особыми волнами, определяющими движение этих электронов. Не часто встречаются случаи, когда в диссертации создается новая наука. Здесь это произошло. Так родилась волновая механика.

Вскоре сказал свое слово Эрвин Шредингер. Он показал, что движение микрочастиц можно описывать привычным и хорошо изученным способом — при помощи дифференциальных уравнений. Конечно, для микромира пришлось написать новое уравнение. Позже его назвали волновым уравнением Шредингера.

В игру вступил третий гений — аспирант Макса Борна Вернер Гейзенберг. Он, перед тем как отправиться на побережье Балтийского моря, чтобы излечиться от сенной лихорадки, передал своему учителю текст статьи — в ней был изложен придуманный им способ вычислять результаты опытов с частицами микромира. Мудрый учитель сразу обнаружил, что ученик, подобно герою Мольера, не знает о том, что говорит прозой. То, что придумал Гейзенберг, было матрицами, давно известными математикам особыми таблицами, составленными из чисел или букв, таблицами, с которыми нужно обращаться в соответствии с правилами, установленными математиками. Но Гейзенберг не только придумал особые матрицы, но и установил, как эти матрицы связаны с явлениями микромира. Он создал матричную механику.

Вскоре оказалось, что эта тройка породила одно и то же. Каждый из них выразил сущность явлений микромира на особом, придуманном им языке. Так микромир предстал перед физиками в трех математических облачениях.

Восторг встретил победителей. Наконец была разгадана тайна воровских орбит, тех, по которым вращаются электроны в атомах. Новая квантовая механика одерживала победу за победой над самыми трудными задачами, над глубочайшими тайнами микромира.

Но эйфория длилась не долго. Гейзенберг запретил даже думать об этих орбитах. Он выдвинул удивительный принцип — принцип неопределенности. Из него следовало, что если известно точное положение электрона (или другой частицы микромира), то нельзя узнать ничего, ровно ничего, о его скорости. А если известно точное значение скорости, то нельзя ничего узнать о его местонахождении. Ясно, что при этих условиях становятся совершенно эфемерными воровские орбиты электронов в атоме. Ведь при движении по орбите скорость частицы должна быть совершенно точно связана с ее положением. А принцип Гейзенберга состоит в том, что ни то ни другое не может быть определено безошибочно, так, чтобы погрешности обоих измерений оставались равными нулю после окончания измерений.

Так микромир, совсем недавно упорядоченный Бором и Зоммерфельдом, был вновь ввергнут в хаос. В ужасный хаос, хаос, страшный тем, что он принципиально неизбежен. Ведь было твердо установлено и многократно проверено, что нельзя отказаться от принципа неопределенности, не разрушив одновременно все здание квантовой физики, не утратив эту волшебную палочку, открывающую пути во все закоулки микромира.

Великий Лоренц, тот, которого называли последним представителем классической физики, говорил, что, если он должен рассуждать о движении электрона, ему необходимо представить себе, что в данный момент электрон находится во вполне определенном месте и движется с вполне определенной скоростью. Он признавал впечатляющие достижения квантовой физики, но не мог отказаться от привычной наглядности, пусть эта наглядность и является воображаемой. Точнее говоря, для того чтобы изучать какое-либо явление, ему казалось необходимым создать модель, мысленную модель, движущуюся в соответствии с законами механики Ньютона.

Никто не мог убедить его отказаться от этой точки зрения, от этой привычки. Никто не мог предложить взамен ничего, кроме запрета. Запрета, не основанного ни на чем, кроме как на интуиции Гейзенберга и на том, что отказ от этого запрета разрушает фундамент новой физики. Лоренц унес в могилу свой протест, свои убеждения, свою растерянность.

А физики один за другим смирялись. Они привыкали к тому, что из хаоса, из невозможности воспроизвести точную картину жизни атома, невозможности представить себе точную модель рождались точные результаты. Столь точные, что лишь ошибки измерительных приборов мешали сказать, что результаты опыта полностью совпадают с результатами расчетов.

И тем не менее оставались сомневающиеся, оставались возражающие. Среди них был и один из создателей новой квантовой механики Шредингер, говоривший примерно так: если нельзя отказаться от этих квантовых скачков, он предпочитает совсем отказаться от квантовой механики. Но он не отказывался. Он решал одну за другой труднейшие задачи, решал при помощи своих уравнений, которые, как первородный грех, скрывают в себе эти квантовые скачки. Он надеялся, что со временем все как-то разрешится.

Среди сомневающихся был и Эйнштейн, вторым — после Планка — ступивший на квантовый путь, внесший решающий вклад в выяснение двуликого единства волн и частиц. Он все реже брался за квантовые задачи, до предела занятый последним делом своей жизни — созданием единой теории поля. Но он не молчал, он раз за разом предлагал своим друзьям Бору и Борну и всем остальным адептам квантовой веры хитроумные вопросы, указывал на парадоксы, возникающие внутри квантовой физики. Он, как и Лоренц, требовал наглядности. Он настаивал на том, что связи между причинами и следствиями существуют на каждом, самом малом шажке, что в любом самом сложном процессе должна существовать возможность выявлять и описывать при помощи уравнений эту связь. Связь между причинами и следствиями.

И каждый раз Бор и его сотрудники, изрядно помучившись, отвечали на каверзные

вопросы Эйнштейна, объясняли суть его парадоксов. А Эйнштейн, признав их правоту, предлагал им следующий вопрос. Предлагал потому, что он не мог допустить, чтобы порядок превращался хаос, в котором не разберешь, куда направлен следующий шаг.

Бор говорил, что нельзя считать хаосом невозможность следить за микрочастицей так, как мы привыкли действовать в макромире. Что причины и следствия оказываются связанными в начале и конце процесса, связанными с величайшей точностью, при которой выявляется расхождение в миллиардную часть миллиардной доли. Это и есть порядок, говорил он. Особый порядок, свойственный микромиру. Эйнштейн соглашался с этим, но он считал, что квантовая теория просто еще не совершенна, не является окончательной. Он надеялся, что в конце концов квантовая теория, сохранив всю свою мощь, избавится от того, что он считал слабостью, от того, что следовало из принципа неопределенности.

И, желая способствовать этому, продолжал придумывать парадоксы.

Эйнштейн умер. Теперь никто не придумывает парадоксов, направленных под основы квантовой физики, проверяющих ее прочность и основательность. Одни смирились, другие, более молодые, воспринимают квантовую теорию такой, какова она есть. Им чужда мысль о том, что в ее основах скрыто неблагополучие. Уж очень высоко взметнулось, очень прочным, выносливым оказалось ее здание.

Прошло еще четверть века, и ученые следующего поколения обнаружили, что не только в микромире, не только из уравнений квантовой теории может рождаться непредсказуемое поведение, непредсказуемое движение, движение, не допускающее точного описания, характеризуемое лишь усредненными параметрами, определяемыми на основе статистики. Да, такое может случаться и действительно случается в макромире, происходит с обычными приборами, с некоторыми из них. С приборами, полностью подчиняющимися законам классической физики — уравнениям Максвелла, уравнениям Ньютона.

Как реагировал бы на это Эйнштейн? Начал бы придумывать новые парадоксы, чтобы вскрыть, что здесь неладно? Или признал бы эти поразительные выводы и заодно согласился с тем, что если такое возможно в макромире, то оно может существовать и в микромире. Об этом можно только гадать.

Кривые против прямых

Как многое в науке, корни этого поразительного открытия уходят в глубь астрономии прошлого века. Астрономы, рассчитывая движение планет и их спутников на основе законов Ньютона, вскоре убедились в том, что, хотя здесь все ясно, кое-что отнюдь не просто. Более того, лобовой атакой здесь не добьешься многого.

Вскоре выяснилась причина. Трудности возникали из-за того, что в закон тяготения входит не само расстояние между притягивающимися телами, а квадрат этого расстояния. Пока речь шла о движении одной планеты вокруг Солнца, эти трудности можно было преодолеть. Правда, результаты вычислений не совпадали с наблюдениями. Ведь вокруг Солнца вращается не одна планета. Задача об одиночной планете — это слишком далеко идущая идеализация. Ясно, что следует ставить задачу точнее. Учесть влияние хотя бы одной ближайшей планеты.

Здесь астрономов ждало разочарование. Эта, казалось, лишь слегка усложненная задача не поддавалась решению. Лучшие математики пришли к заключению о том, что эта задача вообще не имеет точного решения. Так ученые впервые познакомились со знаменитой задачей о движении трех тел, подчиняющихся законам Ньютона. С неразрешимой задачей трех тел. Со временем математики разработали методы приближенного решения этой задачи в важном для практики случае, когда масса одного из тел (Солнца) много больше масс двух других (планет). Наиболее употребительный из этих методов называют методом возмущений. Его суть состоит в том, что сперва решают задачу о движении двух тел — одной из планет и Солнца, а потом используют то обстоятельство, что вторая планета действует на первую гораздо слабее, чем Солнце. Вторая планета лишь слегка возмущает (искажает) простое

движение первой, полученное на начальной стадии решения.

При изучении движения Луны первая ступень — вычисление того, как она двигалась бы вокруг Земли без учета действия Солнца. Конечно, Солнце много больше чем Земля, но оно и много дальше от Луны, а закон тяготения гласит, что сила тяготения убывает при увеличении расстояния так, как растет квадрат расстояния. Поэтому в задаче о Луне влияние Солнца играет лишь роль возмущающего воздействия.

Со временем математики значительно усовершенствовали метод возмущения и теперь могут учитывать одно за другим возмущающее действие все более далеких планет или, изучая движение спутников Юпитера, учитывать не только их взаимодействие, но и влияние Солнца, Сатурна, а если требуется, то и влияние других планет.

Известно, что именно таким путем была открыта планета Нептун. Самые точные расчеты с учетом влияния всех известных ранее планет не совпадали с наблюдаемым движением наиболее удаленной от Солнца планеты Уран. Тогда У. Леверье и независимо от него Дж. Адаме предположили, что расхождение вызвано влиянием неизвестной планеты, движущейся за орбитой Урана. Потребовалось произвести сложнейшие вычисления, чтобы, исходя из отличия видимого движения планеты Уран от расчета, проведенного с учетом возмущающего действия остальных известных планет, предсказать, где на небосводе следует искать неизвестную планету. Леверье, работавший в Париже сообщил свои результаты берлинскому астроному Галле, и тот уже в четвертую ночь нашел вблизи указанного места слабую звездочку, не числящуюся в звездных каталогах. Наблюдая ее в течение некоторого времени, он обнаружил, что звездочка движется по траектории, предсказанной Леверье. Адаме, который годом раньше сообщил свои расчеты королевскому астроному Эри, работавшему по соседству, потерял приоритет открытия, потому что Эри не удосужился провести соответствующие наблюдения.

Мы остановились на этой истории для того, чтобы продемонстрировать мощь метода возмущения, ибо он сыграл важную роль в решении многих задач, не поддающихся точному решению, в частности задач, родственных задаче трех тел. Эти задачи принадлежат к классу нелинейных задач, для их изучения необходимо решать нелинейные дифференциальные уравнения. Название «нелинейные» связано с тем, что график изменения по крайней мере одной из величин, входивших в эти уравнения, изображается не прямой линией, а более сложной кривой.

Задачи такого типа в течение долгого времени возникали только в астрономии и в некоторых областях механики.

Все изменилось после изобретения радио А. С. Поповым, точнее — после того, как на смену искровым радиопередатчикам пришли дуговые, а затем ламповые.

Инженеры должны были научиться рассчитывать ламповые радиопередатчики. Они сразу обнаружили, что характеристики радиоламп, отображающие зависимость электрического тока, протекающего через лампу, от напряжения, приложенного к ее управляющему электроду, не могут быть изображены прямыми линиями, а имеют вид сложных кривых. Первым преодолел эту трудность и добился успеха Бальтазар ван дер Поль. Он применил метод возмущения.

Быстрое развитие радиотехники потребовало от физиков изучения множества проблем, возникавших перед радиоинженерами, нуждавшимися в надежных методах расчета все более сложных схем радиопередатчиков и радио приемников. По-прежнему камнем преткновения были характеристики радиоламп, даже отдаленно не похожие на прямую линию. Вариант метода возмущений, примененный ван дер Полем, позволял решать многие радиотехнические задачи. Однако он обладал одним недостатком, хорошо известным астрономам. Этот метод не давал уверенности в том, что полученное решение действительно является близким к точному решению реальной неупрощенной задачи.

В это время в Московском университете набирала силу школа физиков, созданная Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси. В центре интересов этих ученых и их учеников находилась разработанная ими Общая теория колебаний. Главная мысль, положенная в

основу этой теории, заключалась в слове «общая». Дело в том, что Мандельштам еще в молодости установил глубокое единство, общность колебательных процессов, реализующихся в самых различных явлениях, приборах и машинах. Независимо от конкретной природы колебательных процессов, не имеющих с первого взгляда ничего общего между собой, они обладают глубокой внутренней общностью. Она выражается ярче всего и яснее всего тем, что они могут быть описаны одними и теми же математическими уравнениями, подчиняются этим уравнениям и их решениям. В качестве примера можно указать на качающийся маятник, на мячик, подпрыгивающий над твердым полом, на магнитную стрелку, колеблющуюся вокруг направления север — юг, на детскую игрушку, состоящую из тяжелого шарика, подвешенного на резинке, на птицу, только что опустившуюся на ветку и качающуюся вместе с ней. Каждый может придумать другие примеры. Если рассматриваемые в них колебания не слишком велики, то они обладают общими свойствами: скорость колеблющегося тела достигает наибольшего значения, когда его отклонение от положения равновесия равно нулю. В этот момент возрастание скорости прекращается и начинается ее уменьшение. Скорость достигает нуля, когда отклонение от положения равновесия максимально, безразлично в какую сторону — вправо или влево, вверх или вниз, но максимально.

Мандельштам подчеркивал, что сила Общей теории колебаний основана на глубоком единстве сущности колебательных процессов, выражающейся в том, что все родственные колебательные процессы могут быть описаны одним и тем же уравнением. Поэтому, говорил он, достаточно изучить один из колебательных процессов, решить это уравнение всего один раз. Полученные решения могут быть затем в готовом виде применены ко всем остальным колебательным явлениям и процессам, подчиняющимся этому же уравнению.

Конечно, общность не есть всеобщность. Существует много различных классов колебательных процессов, которые невозможно охватить одним уравнением. Например, стоит привязать к шарiku, подвешенному на резинке, вторую резинку, удерживающую второй шарик, и их совместные колебания будут существенно отличаться от того, как они колеблются по отдельности. Соответственно будет отличаться и уравнение, описывающее колебания двух шариков, связанных между собой. Но и это новое уравнение применимо не только к описанию поведения сдвоенных шариков, но и к изучению многих аналогичных колебательных систем.

Подобных различных классов колебательных систем много. Но каждому из них принадлежит свое большое семейство процессов, обладающих между собой глубокой внутренней общностью. Конечно, каждый класс надо изучать отдельно, заново решая уравнение, описывают этот класс. Однако и при этом экономится много сил, времени и средств.

Главное преимущество состоит в том, что человек, овладевший Общей теорией колебаний, приобретает то, что Мандельштам называл колебательной интуицией, позволяющей судить о новом явлении на основании опыта, полученного при изучении многих других явлений.

Теперь нужно возвратиться к оговорке, сделанной в начале одного из предыдущих абзацев. Перечислив примеры родственных колебательных систем, мы начали следующий абзац фразой, содержащей условие: «...если рассматриваемые в них колебания не слишком велики, обладают общими свойствами».

Весьма неопределенное утверждение! Что значит «не слишком велики»? По сравнению с чем? Как определить «слишком» или «не слишком»?

Может быть, читатель уже сам задумался над тем, почему и зачем написана эта фраза. Ведь все содержание последующих фраз в этом абзаце не зависит от того, «слишком» или «не слишком».

Верно, читатель. Свойства, перечисленные в том абзаце, неизменны. Теперь пора поговорить о свойствах колебательных систем, сохраняющих общность, если их колебания не слишком велики, и теряющих эту общность при интенсивных колебаниях.

Прежде всего нужно условиться, чем различаются «слишком» и «не слишком».

Колебания можно считать «не слишком» интенсивными, если графики, изображающие любую характеристику этих колебаний, можно изобразить одной прямой линией. Например, зависимость отклонения положения маятника от величины внешней силы или зависимость силы тока приложенного напряжения. «Слишком» — если графики этих зависимостей сильно отличаются от прямой линии.

Это определение тоже не является точным или строгим, но теперь ясно, что имеется в виду. Чем сильнее график отличается от прямой линии, тем менее общими оказываются свойства колебательных систем. Конечно, некоторая общность сохраняется, но различия увеличиваются. Ведь не отличаться от прямой линии можно только одним способом — отличаться так мало, что различие оказывается не существенным. Но отличаться можно на бесчисленное количество ладов. Кривая может пересекать прямую один раз, или несколько раз, или множество раз, пересекать круто или полого, и т. д. и т. п. (ведь нужно где-нибудь остановиться). И каждый раз свойства колебательной системы оказываются различными.

Так на основе линейной теории колебаний возникает нелинейная теория колебаний. Этим названием физики привыкли обозначать теорию, изучающую колебания систем, графики свойств которых (их характеристики) не могут быть изображены при помощи одной прямой линии. Здесь важно подчеркнуть слово «одной», потому что ломаная линия, состоящая из нескольких прямых, является не прямой, а кривой (а не прямой) линией.

Ламповый генератор, изученный ван дер Полем, обладал не прямой характеристикой. Поэтому его нельзя было изучить при помощи хорошо разработанных методов линейной теории колебаний. Отличия характеристики от прямой линии были существенными, именно эти отличия определяли замечательные особенности лампового генератора. Но характеристики были не настолько непрямы, чтобы воспрепятствовать применению метода возмущений. Это позволило ван дер Полю добиться успеха.

Зная о недостатке варианта метода возмущений, примененного ван дер Полем (этот недостаток не был профессиональной тайной астрономов или математиков), Мандельштам поручил своему аспиранту А. А. Андронову хорошо владевшему математикой, поискать в трудах математиков, занимавшихся проблемами астрономии, более подходящие варианты метода возмущений.

И Андронов нашел.

Новое притяжение, или Системы с короткой памятью

Собственно говоря, он нашел два метода, взаимно дополнявшие друг друга. Один из них был разработан французским математиком А. Пуанкаре, а второй казанским математиком А. М. Ляпуновым.

Пуанкаре разработал для решения задач астрономии вариант метода возмущений, позволяющий в ходе вычислений проверять, действительно ли получаемое приближенное решение правильно отображает особенности исследуемого процесса.

Ляпунов интересовался не менее важным вопросом: когда исследуемое явление может существовать длительное время? То есть является ли оно устойчивым или при определенных условиях теряет устойчивость и возникают процессы, приводящие к его разрушению. Ляпунов нашел способ решать задачу об устойчивости без каких-либо специальных опытов. Для астрономов это очень важное обстоятельство — ведь в астрономии активные опыты, опыты с воздействием на изучаемый объект, совершенно невозможны. Он показал, как ответить на вопрос об устойчивости вычислительным путем — изучая свойства уравнений, описывающих исследуемое явление. Метод Ляпунова применим к любому решению задачи о периодических движениях, независимо от того, каким путем получено решение.

Андронов не только нашел и изучил соответствующие работы Пуанкаре и Ляпунова, но показал, как следует применять их методы для решения задач нелинейной теории колебаний. Этим Андронов помог широкому развитию нелинейной теории колебаний и ее

практическому применению к задачам радиотехники, а позднее и в области систем автоматического регулирования и управления различными процессами и устройствами.

Андронов заметил, что способность нелинейных колебательных систем в течение длительного времени пребывать в состоянии периодических колебаний зависит от ряда условий, общих всем системам такого рода. Прежде всего система должна получать энергию извне. Если приток энергии прекращается, то амплитуда колебаний немедленно начинает уменьшаться и будет уменьшаться до тех пор, пока колебания не затухнут полностью. Это значит, что в такой колебательной системе всегда имеются внутренние «источники потерь», точнее, механизмы, превращающие энергию колебаний в тепло.

При таком подходе генератор следует считать открытой системой: в него втекает энергия от источника энергии (например, батареи) и из него можно извлекать энергию порождаемых в нем колебаний. Одновременно из него неизбежно вытекает поток тепловой энергии.

Можно говорить о совокупности генератора колебаний и источника энергии как о единой системе — замкнутой системе. Она может работать независимо от внешнего мира, если она полностью изолирована от него. Но это неравновесная система. Она не находится в состоянии внутреннего равновесия. Первоначально весь запас энергии сосредоточен в источнике. Такое состояние неустойчиво. Второе начало термодинамики указывает на то, что путь развития неравновесной системы предопределен. В ней должен происходить процесс перехода к равновесию. Перехода энергии, запасенной в любой форме, в тепловую энергию с последующим выравниванием температуры во всей системе и с прекращением ее работы.

Андронов отметил, что в нелинейной колебательной системе всегда существует механизм, управляющий расходом энергии источника, и назвал его механизмом обратной связи. Механизм отбирает от источника часть энергии для того, чтобы поддержать свою работу.

Колебательные системы, способные самостоятельно управлять протекающими в них процессами, Андронов назвал автоколебательными (самоколеблющимися) системами, а процесс самоподдерживающихся колебаний он назвал автоколебаниями. Дело, конечно, не в названии, а в сути, и в этой сути нам надо разобраться.

Одним из важнейших выводов нелинейной теории колебаний явился вывод о том, что процессы, описываемые нелинейными дифференциальными уравнениями, являются полностью упорядоченными до тех пор, пока они развиваются только под действием внутренних сил или если силы, действующие на них извне, полностью известны. Любое отклонение от порядка, от точной связи между причинами и следствиями, возможно только в том случае, если в игру вступают случайные силы, случайные воздействия. Воздействия, для описания которых необходимо применять методы статистики. Такие воздействия могут возникать и внутри самих изучаемых систем, например, в результате хаотических тепловых движений их частей. Ученые называют такие хаотические движения флуктуационными движениями или, короче, флуктуациями.

Таким образом Общая теория колебаний показала, что линейные и нелинейные колебательные процессы и системы, участвующие в колебательных процессах, полностью соответствуют понятиям классической физики о связи причин и следствий.

Хаотическое движение в таких колебательных системах возникает только в результате действия флуктуации.

Но некоторые нелинейные колебательные системы удивительным образом способны противодействовать стабилизирующему влиянию флуктуации. Линейные колебательные системы не обладают такой способностью. Например стрелка чувствительного измерительного прибора, в частности стрелка чувствительного вольтметра или амперметра, никогда не может стоять неподвижно, даже если прибор никуда не включен. При этом стрелка под влиянием хаотических ударов молекул воздуха непрерывно совершает небольшие колебания вокруг нулевой отметки. Размахи этих хаотических колебаний

увеличиваются по мере увеличения температуры воздуха, потому что при этом возрастают хаотические тепловые движения молекул воздуха, увеличивается сила их ударов о стрелку. Такие же хаотические блуждания можно увидеть, наблюдая при помощи микроскопа положение маятника, огражденного от любых воздействий, за исключением ударов молекул воздуха.

Хаотические движения линейных колебательных систем, свободных от каких-либо регулярных внешних воздействий, являются всеобщим правилом, а не исключением. Это относится не только к их положениям равновесия. Но блуждания около положения равновесия можно заметить легче и проще, чем, например, отклонения от регулярного колебательного движения.

Иначе ведут себя нелинейные колебательные системы, например ламповые генераторы электрических колебаний, в том числе радиопередатчики, или обыкновенные часы. Большинство часов, снабженных маятником или балансиrom — колесиком с пружинкой, — применяемым в наручных и карманных часах, не начинают идти даже тогда, когда пружина заведена или гиря поднята. Для того чтобы заставить часы идти, нужно заставить маятник совершать колебания, нужно его толкнуть. Если толчок слаб, маятник быстро остановится, быстрее, чем если бы он не входил в состав механизма часов. Но если толчок превзошел определенный предел (физики и часовщики говорят - превзошел порог),

Основной чертой всех этих систем и устройств является то, что они могут находиться в состоянии покоя в одном или нескольких состояниях движения, причем как состояние покоя, так и состояние движения может быть устойчивым или неустойчивым. Разница между устойчивым и неустойчивым состоянием состоит в том, что нелинейная система всегда, несмотря на внешние толчки или другие воздействия, сама возвращается в устойчивое состояние. Так, часы стоят или идут на руке или в кармане человека, независимо от того, идет он, работает или едет в тряской телеге. Если же система обладает неустойчивыми состояниями, то она легко «уходит» из них в результате малейшего толчка, даже вследствие тепловых движений молекул. И ее невозможно удержать в неустойчивом состоянии иначе, как переделав ее так, чтобы неустойчивое состояние превратилось в устойчивое.

Создается впечатление, что устойчивые состояния притягивают к себе автоколебательную систему, если она почему-либо попадает в их окрестность. Система стремится к порядку, к состоянию равновесия или к периодическому движению. Существенно, что, наблюдая систему в покое или в режиме периодических колебаний, невозможно установить, каким было первоначальное состояние, бывшее исходным в процессе перехода к одному из устойчивых состояний автоколебательной системы. Автоколебательная система, пришедшая в положение покоя или периодического состояния, не сохраняет память об исходном состоянии. В ней теряется связь следствия с отдаленной причиной. Различные начальные условия приводят к одинаковым конечным результатам. Ситуация, кажущаяся парадоксальной с точки зрения классической физики с ее однозначной связью причин и следствий. Связью, позволяющей, хотя бы в принципе (если вычисления не слишком громоздки), восстановить причину по известным следствиям или точно предсказать следствие, если известна причина.

Общая теория колебаний охватывает не только системы, подобные маятникам или резонансным контурам, состоящим из катушки индуктивности и конденсатора. В сферу применения этой теории входят струны и органые трубы, волны на воде и в воздухе, даже световые волны и радиоволны. Точнее, все системы, состояние которых изменяется не только во времени, но и в пространстве. Такие системы объединяются названием «распределенные системы» (распределенные в пространстве).

Распределенные системы и процессы в них тоже следует подразделять на линейные и нелинейные. Натянутая струна — типичная линейная система. Оттянув из положения равновесия или ударив молоточком, можно привести ее в состояние колебаний.

Колеблющаяся струна возбуждает волны в воздухе — звуковые волны. Эти волны уносят с собой энергию, запасенную в колеблющейся струне. Ее колебания постепенно затухают, и она останавливается в положении равновесия. Затуханию колебаний струны способствует и то, что часть энергии, запасенной в ней, переходит в тепло, в тепловые колебания ее атомов.

Но, воздействуя на струну смычком, можно заставить ее звучать сколь угодно долго. Струна и смычок при этом образуют нелинейную систему. Нелинейный закон трения между струной и смычком обеспечивает передачу энергии от равномерно движущегося смычка к струне, превращение этой энергии в энергию колебаний струны.

Аналогично ведет себя органная труба. Натянув на ее начало резиновую пленку и щелкнув по ней, мы возбудим в трубе воздушную волну, которая вскоре затухнет. Но если при помощи мехов или вентилятора постоянно продувать сквозь трубу поток воздуха, труба начнет звучать и будет звучать все время, пока сквозь нее продувают воз-Дух. Проведя несложный опыт, например продувая вместе с воздухом дым и наблюдая происходящее при помощи стробоскопа, можно увидеть, как с выходного конца трубы будут срываться маленькие воздушные вихри. Вихри будут срываться периодически, причем период определяется главным образом длиной трубы. Труба и протекающие через нее поток воздуха при этом объединяются в нелинейную систему. Нелинейность вызывается тем, что при некоторых условиях объем воздуха начинает изменяться не пропорционально изменениям давления (непропорциональная зависимость является нелинейной). Что же лежит за подобными процессами, какой механизм управляет ими?

Грубые системы и странные аттракторы

Весь опыт исследования нелинейных систем показывал, что им свойственно переходить от неупорядоченных состояний к упорядоченным, от хаотических движений к регулярным, к периодическим колебаниям и периодическим волнам. Этот опыт был обобщен Андроновым с помощью понятия грубой системы. Он высказал гипотезу о том, что в природе и в специальных опытах могут длительно существовать только такие состояния и процессы, которые не разрушаются случайными воздействиями и поддерживаются за счет энергии, поступающей в систему извне. В совместной статье Андронова и математика Л. С. Понтрягина в 1937 году этой гипотезе была придана математическая форма. Постепенно физики привыкли к тому, что в грубых системах, если они снабжаются энергией от внешнего источника и затрачивают ее, превращая в тепло, возможны только состояния равновесия и периодические процессы. Причем система сама по себе, за счет своих внутренних свойств, притягивается к ним из любого исходного состояния.

Этим мнением физики с успехом руководствовались свыше тридцати лет. Но оказалось, что это не так. В 1971 году подобно грому из ясного неба прозвучала статья Д. Рюэля и Ф. Такенса с безобидным названием «О природе турбулентности». Турбулентность — это неупорядоченное хаотическое движение жидкостей и газов, характеризующееся самопроизвольным возникновением вихрей размеры и моменты их рождения могут быть случайными.

Жидкости и газы текут спокойно и упорядоченно, если скорости течения малы. При этом в них как бы сосуществуют слои, плавно переходящие один в другой. Например, при течении внутри трубы пристенные слои жидкости и газа остаются неподвижными. Они сцеплены со стенками трубы силами притяжения, действующими между молекулами, так как молекулы, образующие стенку трубы, не могут сдвинуться с места, они удерживают возле себя молекулы жидкости или газа, непосредственно контактирующие со стенкой. По мере удаления от стенки скорость течения возрастает, достигая максимума на оси трубы. Сопротивление такому течению зависит от вязкости жидкости или газа и размеров трубы, причем оно линейно (пропорционально) возрастает со скоростью.

Однако такой рост не беспределен. О. Рейнольдс в 1883 году провел серию наблюдений течения жидкостей в прозрачных трубах. Окрашивая отдельные струйки жидкости,

установил, что по мере увеличения скорости спокойное течение, при котором окрашенные струйки не разрушались, внезапно сменяется хаотическим течением. Он выяснил, что эта внезапность характеризуется вполне определенным универсальным условием. Для характеристики этого условия он ввел величину, которую следует вычислять, умножая скорость течения вдоль оси трубы на диаметр трубы и деля это произведение на вязкость текущей жидкости или газа. Эта величина приобрела огромное значение в дальнейшем развитии гидродинамики и аэродинамики. Ее называли числом Рейнольдса. Главным результатом опытов Рейнольдса было открытие странного факта — спокойное течение переходило в турбулентное когда число Рейнольдса превышало 2000. Почему именно 2000 — оставалось тайной. Эта тайна не разъяснена до сих пор. Она бросает вызов ученым своей кажущейся простотой.

Первым попытался атаковать эту тайну Пуанкаре. Это было в 1912 году. Чего он достиг? Понял, что между потерей устойчивости и статистикой обязательно существуют какие-то еще не выявленные связи. Затем и другие крупные ученые — физики и математики — пробовали здесь свои силы, но продвинуться дальше общих соображений им тоже не удалось. Первые успехи пришли только в шестидесятых годах. Главную роль здесь сыграли молодые советские ученые Д. В. Аносов и Я. Г. Синай. Они построили математические и физические модели, демонстрирующие появление неустойчивых траекторий движения молекул, превращение упорядоченного течения в неупорядоченное.

После этого сказали свое слово Рюэль и Такенс. Вернее, они сказали два слова. Эти слова были «странный аттрактор».

Странный аттрактор — дитя нелинейной теории колебаний, хотя он родился в стороне от классических задач этой теории. Он объяснил тревоживший ученых факт: при развитии турбулентности рождаются не «истинно любые» вихри. В ограниченных системах, например в трубах, или при движении в воздухе крыла самолета практически не могут возникнуть очень малые и очень большие вихри. Размеры рождающихся вихрей тяготеют к определенным величинам, зависящим от конкретных условий опыта. Тяготеют, значит, группируются каким-то образом, определяемым статистическими характеристиками опыта. Это же относится к моментам рождения вихрей. Размеры и моменты как бы тянутся к какой-то определенной области значений. Их как бы притягивает что-то. Что-то странное. Так родились эти два слова («аттрактор» — («притягатель», от английского «to attract» — «притягивать») — Странный аттрактор.

Вслед за этим постепенно, но до странности быстро странный аттрактор проник в свою прародину, в нелинейную теорию колебаний. В стане классической нелинейной теории колебаний время от времени возникали странные неувязки. Иногда системы, которым надлежало совершать регулярные периодические движения, странным образом переходили в хаотический режим. Особенно склонны к этому генераторы очень коротких радиоволн и ультразвуков. Лазеры, которые в соответствии с предсказаниями теории должны генерировать весьма одноцветные монохроматические волны, склонны излучать хаотические пички — порции световых волн, каждая из которых немного отличается от других по цвету, то есть по длине волны. Было создано более десятка теорий, претендующих на объяснение пикового режима лазеров. Все они в какой-то мере объясняют какие-то частные случаи, но ни одна из них не охватывала всей совокупности явлений.

Когда слова «странный аттрактор» были прочитаны специалистами в области нелинейной теории колебаний, ученые прозрели. Поняли, что совершили тяжкий грех, вообразив, что они святее папы. И были за это проучены божественной Наукой.

Они в своей гордыне приписали себе эвристические способности Общей теории колебаний, нелинейной части этой теории, позволяющей пользоваться изученными явлениями и процессами как моделями при решении новых задач.

В действительности оказалось, что интуиция специалистов в области нелинейных колебаний, даже интуиция самых проницательных из них, покоится только на результатах изучения простейших систем, таких, как догалилеевы часы, давно вышедшие из

употребления, и ламповый генератор, изученный еще ван дер Полем. Словом, их интуиция опирается не на результаты исследования сложных систем, где не все удавалось выяснить до конца, а на свойства систем с одной степенью свободы. Таких систем где энергия колебаний периодически превращается из потенциальной в кинетическую и обратно или из энергии заряда в конденсаторе в энергию тока в катушке.

Именно в таких простейших системах нелинейная теория допускает только одно состояние покоя и одно состояние периодического движения. Система, испытавшая толчок или любое другое внешнее воздействие, неизбежно возвращается в одно из этих дозволенных состояний, в состояние покоя или периодического движения, притягивается к ним. Если одно из этих состояний неустойчиво, то система, куда бы ее ни забросило, притягивается к Другому состоянию. Если же почему-либо оба — состояние покоя и состояние периодического движения — не устойчивы, то такая система просто не может существовать. С чего бы ни началось ее движение, размах колебаний будет возрастать до тех пор, пока она не выйдет из строя, не испортится (если предварительно не выйдет из строя питающий ее источник энергии).

Если простейшая колебательная система с одной степенью свободы предоставлена самой себе, свободна от внешних воздействий, в ней не может возникнуть хаос, за исключением очень слабой реакции на неизбежные тепловые движения молекул. Но при этом система не уклонится далеко от устойчивого состояния равновесия или периодического движения.

Устойчивое равновесие и устойчивое периодическое движение притягивают к себе простейшую нелинейную колебательную систему. Они являются притягивающими состояниями — аттракторами, но ничего странного в этих аттракторах нет.

Станным было то, что опытные ученые в каком-то состоянии самогипноза переносили эти свойства простейших нелинейных колебательных систем на более сложные. Они считали, что аттракторы в сложных нелинейных колебательных системах тоже всегда ведут себя просто.

Но теперь, узнав, что нелинейные процессы, происходящие в быстро текущих газах и жидкостях, могут самопроизвольно порождать хаос, что в них могут возникать странные аттракторы, физики задумались. Конечно, рассуждали они, газ и жидкость состоят из огромного количества атомов или молекул, не удивительно, что в них может возникать хаос. Естественно попытаться узнать, сколь сложной должна быть нелинейная система, чтобы в ней мог появиться странный аттрактор, чтобы в ней мог самопроизвольно возникнуть хаос.

Наука жестока. Она умеет устыдить самонадеянных. А здесь оказалось, что самые мудрые впали в грех гордыни.

Выяснилось, что странный аттрактор может появиться в системе, которая всего на полшага, на полступеньки по сложности отстоит от простейшей нелинейной колебательной системы.

Простейшей называют систему с одной степенью свободы. Естественное простейшее усложнение — две такие системы, связанные между собой. Каждая из них обладает по одной степени свободы. Их совокупность обладает двумя степенями свободы. Пример — два маятника, связанные при помощи слабенькой пружинки. Или два резонансных контура, расположенные по соседству. Они связаны электромагнитными полями, окружающими их катушки и конденсаторы.

Однако физики знали, что существуют и промежуточные системы, имеющие всего полторы степени свободы. Например, колебательный контур, связанный с еще одной катушкой, концы которой замкнуты сопротивлением.

В уединенной катушке, замкнутой сопротивлением, не могут происходить колебания. Возбудив в ней ток, легко убедиться, что он быстро прекратится, а энергия этого тока окажется затраченной на нагревание сопротивления.

Но если такая катушка, замкнутая на сопротивление помещена рядом с катушкой простейшего лампового генератора, изученного ван дер Полем, она способна радикально

изменить поведение генератора. Никто об этом не знал потому что все считали это невозможным. Физики не искали новые режимы в генераторах с полутора степенями свободы. А если случайно обнаруживали в них хаотическое поведение, оставляли без внимания, относя его появление за счет случайных помех.

Такая странная ситуация, по-видимому, встретилась впервые!

Но как только физики начали искать, начали более внимательно исследовать генераторы с полутора степенями свободы, они обнаружили условия, при которых в них появлялся странный аттрактор, появлялся хаос и вместо периодических колебаний прибор генерировал шум. Конечно, это был электрический шум, хаотического изменения тока и напряжения. Но стоило присоединить к такому генератору, перешедшему в режим генерации хаотических колебаний, громкоговоритель или осциллограф, как шум становился слышимым или видимым.

Физики поняли и то, как это происходит. После включения источника питания генератора в нем самопроизвольно возникают и быстро увеличиваются колебания, период которых все время изменяется. Но при некоторых условиях система с полутора степенями свободы не может прийти в состояние устойчивых периодических колебаний, у нее нет простого аттрактора. В какой-то момент колебания прекращаются, и система на мгновение возвращается в состояние покоя. Но это состояние тоже неустойчиво.

Сразу вновь возникают и возрастают колебания. Но процесс не повторяет вторично того, что происходило в первый раз. Исходное состояние, скорость возрастания колебаний, пробегаемые при этом изменяющиеся значения периода — все отличается от первого раза. Затем новый срыв и новое начало, и так до тех пор, пока включен источник питания.

Многочисленные возрастания и мгновенные прекращения колебаний, каждое из которых не связано с предыдущим, создает полнейший хаос. Ученые всмотрелись глубже в механику возникновения этого хаоса. Поняли: причина кроется в том, что положение, в котором происходит срыв очередного нарастающего колебания, определяется случайными хаотическими токами и напряжениями, связанными с тепловым движением электронов, движущихся в катушках, конденсаторе и проводах схемы. После срыва колебаний система не попадает точно в положение равновесия. А если случайно попадает, то ее сразу выбрасывают из него на случайную величину и со случайной скоростью тепловые движения электронов. Поэтому начало каждого цикла тоже определяется законами случая. Но есть во всем этом и нечто общее. Многократно повторяющееся возникновение, рост и срыв колебаний. Ограниченная окрестность вокруг положения покоя, в которую система приходит после срыва, и ограниченное вокруг определенной длительности время, в течение которого происходит возрастание колебаний. Наибольшие амплитуды нарастающего колебания, достигаемые к моменту их прекращения, тоже заключены в определенных границах. В результате начальные и конечные характеристики каждого цикла колебаний притягиваются не к определенным значениям (к состоянию покоя или периодического движения), а внутрь сравнительно узких областей, обладающих определенными границами. Это и есть странный аттрактор. Он притягивает систему к состоянию хаотического движения.

Но он существует не всегда, а лишь при вполне определенном сочетании характеристик системы.

Это простейший странный аттрактор. Физики, конечно, принялись искать нечто подобное в разных процессах И нашли странные аттракторы в более сложных нелинейных колебательных системах. Возникновение и структура возникающего хаоса в более сложных системах еще не изучена. Ученые работают, и работают усердно, но задачи очень сложны. Они пока не поддаются теоретическому исследованию, а эксперимент приводит к столь запутанным результатам, что без разработки соответствующей теории его невозможно полностью осознать.

Пока удалось лишь выяснить, что существует несколько путей, по которым нелинейные колебательные системы переходят от регулярных движений к хаотическим. Наиболее простой из них называется путем удвоения. Он состоит в том, что колебательная

система, совершающая регулярные колебания, внезапно теряет устойчивость и перескакивает в новый режим регулярных колебаний, характеризующихся удвоенным (по сравнению с первоначальным) периодом. Но вскоре система вновь теряет устойчивость и перескакивает в режим с учетверенным периодом колебаний, и так продолжается неограниченное число раз. При этом моменты потери устойчивости и состояния, из которых начинается следующий кратковременный режим, распределены совершенно хаотически. В результате таких последовательных удвоений очень быстро начинается настоящий хаос.

Легче отыскать способы воспрепятствовать рождению странных аттракторов, чем разобраться в деталях их возникновения. Так, например, еще до открытия первых странных аттракторов удалось заставить лазеры работать в беспичковом регулярном режиме. Удалось обеспечить крайне высокую стабильность периода колебаний кварцевых генераторов, самые простые из которых работают в кварцевых часах. Погрешность хода таких часов обычно не превосходит одной секунды в сутки и вызывается не возникновением странного аттрактора, а влиянием изменений внешней температуры на сложную электронную микросхему этих часов.

Но есть области, где воспрепятствовать рождению странных аттракторов невозможно. Эти области — атмосфера и океан. Здесь не хватает не только знаний, но и энергии. Запасы энергии в атмосфере и в океанах столь велики, что управлять ими, особенно не владея их секретами, невозможно. Максимум, что пока удастся сделать, — это вызывать локальные дожди и предотвращать град, временно рассеивать небольшие участки облачности и... хотелось написать — и предсказывать погоду, но... несмотря на помощь метеорологических спутников и самых больших ЭВМ, прогнозы погоды оставляют желать лучшего.

Метеорологи справедливо предъявляют претензии к физикам. В атмосфере и в океане всегда существует турбулентность, постоянно возникает и исчезает множество небольших и малых вихрей, а спутники обнаруживают большие и даже гигантские вихри — циклоны, резко выделяющиеся своей более или менее спиралевидной облачностью. Крупные циклоны и антициклоны живут достаточно долго и перемещаются сравнительно плавно. Поэтому для областей, расположенных внутри циклона или антициклона, метеорологи могут предсказывать погоду столь же надежно, как это делали наши деды, опиравшиеся не на науку, а на опыт. Завтра, говорили они, почти наверняка будет такая же погода, как сегодня. Деды не знали о циклонах и антициклонах, поэтому ошибались, когда оказывались там, где соприкасается зона циклона с зоной антициклона. В этих пограничных зонах — метеорологи называют их атмосферными фронтами — прогноз погоды особенно ненадежен. Бессильны и деды. Как им знать, развеет ли сильный ветер густую облачность или принесет грозовые облака зимой снегопад или снег с дождем, вызывающим сильные оледенения? В этих случаях ошибаются и опытные метеорологи. Здесь бессильны ЭВМ. В пограничных областях всегда дуют сильные ветры и существует сильная турбулентность, хаотические неупорядоченные атмосферные течения. Совершенно бессильны метеорологи и тогда, когда в таких турбулентных зонах внезапно возникают разрушительные смерчи, сравнительно небольшие по размерам — диаметром в десятки и сотни метров — бешено вращающиеся вихри, втягивающие и поднимающие воду и почву, людей и животных, автомобили и дома, ломающие деревья и опоры линий электропередач. Наибольшее, что доступно метеорологам, — это дать общее предупреждение: здесь возможно возникновение смерчей. Но они не могут указать, где и когда те возникнут и куда двинутся. Остается лишь радоваться, когда предупреждение не сбывается.

Современные физики и метеорологи опасаются того, что загадка атмосферной турбулентности перейдет в наследство тем, кто еще сидит на школьной парте или играет в детских яслях.

Солитоны

Нелинейная теория сражается и с другой загадкой. Речь идет о поразительно

устойчивых образованиях, иногда возникающих и длительно существующих в средах, обладающих нелинейными свойствами, например в плазме. В 1958 году советский физик Р. З. Сагдеев усмотрел аналогию между некоторыми типами волн в плазме и волнами на мелкой воде. Он установил, что в плазме могут возникать и распространяться особые одиночные (уединенные) волны. Он разъяснил, что это является действием того, что плазма обладает нелинейными свойствами. Теперь с этим хорошо знакомы физики и конструкторы, проектирующие современные модели плазменных установок, таких, как «Токамак».

В 1965 году два американских физика, Н. Забуски и М. Крускал, изучали нелинейные волны в плазме, моделируя их сложное поведение при помощи ЭВМ. Они знали о наблюдавшихся ранее в плазме необычных волнах. Их особенностью была способность существовать в одиночестве, при отсутствии других волн, и не изменять свою форму на протяжении длительного пути.

Ранее никто не интересовался тем, как две таких волны взаимодействуют одна с другой при их встрече. Такая встреча возможна не только при движении двух уединенных волн в противоположных направлениях, но и если одна из волн догоняет другую. Такой обгон возможен потому, что скорость уединенной волны, переносящей большую энергию, превосходит скорость меньшей волны.

ЭВМ показала Крускалу и Забуски, что уединенные волны при столкновении ведут себя подобно частицам. Поэтому они сочли, что название «уединенная волна» может повлечь к недоразумениям, и решили изъять из названия слово «волна».

Оставить в наименовании одно слово «уединенная» без подлежащего казалось неприемлемым. Тогда они решили вместо названия ввести термин, в котором объединились бы особенности объекта: его уединенность и его сходство с частицей. Так родился термин «солитрон». Начало его определяло свойство уединенности (петь соло, концерт для скрипки соло и т. п.). Вторая часть следовала принятым названиям микрочастиц. Например, электрон. Однако при написании статьи им стало известно, что слово «солитрон» занято. Такое название принадлежало одной из фирм. Чтобы избежать тяжбы о незаконном использовании «торговой марки», они в последний момент убрали из своего термина букву «р». Так родилось понятие «солитон» — уединенное образование, совмещающее свойства частицы со свойствами необычной волны.

Как это часто бывает в науке, оказалось, что С. Рассел, наблюдая в 1834 году волны при движении барж в одном из английских каналов, обнаружил удивительные уединенные волны, бегущие с постоянной скоростью и не изменяющие своей формы на больших расстояниях. Это была загадка, которую так и не удалось разгадать. Крупные ученые, пользовавшиеся всеобщим уважением, астроном Дж. Эри и специалист в области гидродинамики Д. Стоке отрицали возможность существования уединенных волн. Постепенно об этой загадке забыли. Лишь в 1895 году голландский ученый Д. И. Кортевег и его ученик Где Фриз, ставший позже школьным учителем и прекративший научную работу, получили уравнение, описывающее процессы, в которых участвуют уединенные волны, обнаруженные Расселом. Это уравнение постигла участь уединенных волн: о нем забыли. А лишь через семьдесят лет физики возвратили это уравнение и эти волны в арсенал науки.

Курьезом в науке оказалось и явление, которое каждый может увидеть, присмотревшись к поверхности очень горячего черного кофе. При этом чашку с кофе следует оберегать от толчков и потоков воздуха: они не играют роли в этом явлении, но могут помешать его появлению. На поверхности кофе через некоторое время установится подобие сетки, образованной большим количеством примыкающих один к другому шестиугольников. Надо заметить — дело не в кофе. Просто на черном фоне легче увидеть регулярное распределение зон, в которых из глубины на поверхность поднимается горячая жидкость, зон, над которыми образуется белесый пар.

Это один из вариантов ячеек Бенара, которые легче наблюдать в стоящем на электрической плитке неглубоком сосуде. Для того чтобы облегчить наблюдение, следует добавить в воду какой-либо легкий порошок. По мере нагревания на поверхности воды

образуется шестигранная сетка, видимая более четко, чем в чашке кофе.

Этот редкий пример, когда нерегулярное турбулентное совмещение жидкости, вызванное конвекцией (внутренним тепловым движением различающихся по плотности частей жидкости, возникающим вследствие различия температур), превращается в регулярное перемешивание, в регулярную конвекцию.

Но возвратимся к солитонам.

Датой второго рождения солитона следует считать 1938 год, когда советские физики Я. И. Френкель и Т. А. Конторова в своей теоретической работе, посвященной исследованию физики твердого тела, обнаружили, что в кристаллах могут возникать необычные образования, которые являются комбинацией пустого места в решетке кристалла и места, в котором находится не один (как это должно быть в идеальном кристалле), а два атома. Такое образование представляет собой простейший случай нарушения порядка внутри кристалла. Его называют «дислокацией», что означает в грубом переводе «нарушение местоположения».

Понадобилось почти тридцать лет, чтобы ученые поняли, что дислокация Френкеля — Конторовой обладает всеми свойствами солитона и, изучая ее поведение, можно пользоваться результатами исследования других солитонов.

Солитоны, как и странные аттракторы, теперь опознают во многих явлениях, объединенных основной чертой — нелинейным законом изменения хотя бы одной величины, существенной для их возникновения и развития. Так, например, физико-химики хорошо изучили процессы горения, которые иногда происходят лишь в тонком слое, отделяющем холодное горючее от продуктов горения. Именно в этом слое происходит процесс окисления горючего, процесс горения. Этот слой обычно называют фронтом пламени или фронтом горения. Раз возникнув, он проявляет удивительную устойчивость, двигаясь с постоянной скоростью относительно горючего вещества, если условия горения (состав горючего и его начальная температура, состав воздуха и его температура и т. п.) остаются неизменными. Этот фронт движется в пространстве, если горючее неподвижно, или остается неподвижным, когда горючее поступает к месту горения с постоянной скоростью.

Солитоном является также волна детонации при ее движении во взрывчатом веществе. Солитоном является ударная волна, возбуждаемая взрывом, или ударные волны, возникающие в плазме или в воздухе, когда самолет преодолевает звуковой барьер.

В начале изучения этих и других подобных явлений возникновение и устойчивость ударных волн казались весьма таинственными «событиями». Эмоциональные ученые говорили о катастрофе — градиентной (или скачковой) катастрофе, угрожающей всей науке. Ситуация прояснилась, когда было обнаружено, что в большинстве нелинейных сред волны различной длины движутся с различными скоростями, а при взрывах или при турбулентных процессах в плазме возбуждаются волны со множеством различных длин волн. Эти волны, постепенно догоняя друг друга, складываются в единую волну, передний фронт которой становится все круче. Так возникает ударная волна, характеризующаяся разрывом — резким переходом от малого давления в газе или плазме, там, куда фронт еще не дошел, к большому давлению за фронтом, — скачком давления, быстро увеличивающегося на самом фронте. Этот переход и вызывает резкий удар, когда такая волна набегае на препятствие.

Сколь ни удивительны все эти и другие явления, родственные солитонам, сами солитоны поражают тем, что могут длительно существовать, не меняя своей формы даже в тех средах, где нет ни источников энергии, ни процессов, поглощающих энергию.

Физикам удалось разгадать тайну этих солитонов, понять, как они сохраняют свои свойства несмотря на возмущения, приходящие извне. Здесь возможны два механизма. Солитон может поглощать внутрь себя энергию возмущающего воздействия. При этом он остается солитоном, хотя энергия его постепенно возрастает. Бывает и так, что солитон пропускает энергию возмущения сквозь себя, поглощая ее своим передним фронтом и излучая через задний фронт. Физики говорят в этом случае, что энергия возмущающего воздействия проходит в «хвост» солитона.

Примером солитона, набирающего энергию, является нагонная волна. Нагонная волна — это одиночная волна, возникающая на воде, если скорость ветра постоянна и равна скорости распространения волн в данном месте. Например, нагонные волны возникают — к счастью, не часто — при ровном западном ветре в Финском заливе. Впитывая в себя энергию ветра, движущегося вместе с ней, нагонная волна постепенно возрастает и начинает быстро увеличиваться, когда сужающиеся берега залива втискивают ее в устье Невы. Так возникают наводнения, угроза которых может быть ликвидирована только дамбой, возводимой сейчас в Финском заливе.

Еще более разрушительными бывают нагонные волны, образуемые тайфунами в водах Бенгальского залива, уносящие иногда десятки тысяч жизней. Этому способствует невозможность точного предсказания возникновения этих убийственных волн. Для их грозного развития нужны особые величины скорости и направления ветра, а оценить ход турбулентных процессов не могут и ЭВМ. Здесь тоже приходится ограничиваться предупреждениями об угрожающей ситуации. Но когда эти предупреждения не сбываются, бдительность населения притупляется — и, несмотря на предупреждение, катастрофа оказывается неожиданной.

Свойствами солитонов обладают и волны океанских приливов.

Иногда говорят о том, что цунами тоже солитон. Это так, но цунами не обычный уединенный солитон, а более редкий — множественный солитон. Ведь цунами бежит группой следующих одна за другой волн.

«Бросая в воду камешки, смотри на круги, ими образуемые; иначе такое бросание будет пустой забавою». Последуем же этому совету Козьмы Пруtkова.

Вспомним. Камень падает в воду, увлекая ее в глубину. На месте его падения образуется воронка. Потом вода заполняет ее, вздыбливаясь по инерции горкой. От вершины горки зачастую отрывается, поднимается ввысь и падает капля. Но это деталь. Не она определяет картину. Горка вновь опускается. В ее центре образуется углубление, а ее края разбегаются, образуя первую кольцевую волну. Так продолжается несколько раз. Вода в месте падения постепенно успокаивается, а по ее поверхности разбегается в стороны группа кольцевых волн. По мере удаления от центра они постепенно затухают, и все успокаивается.

Цунами начинается аналогично, но не совсем так. Момент рождения цунами, вероятно, не наблюдал никто. Ведь оно возникает в результате сильного подводного землетрясения, а оказаться в его эпицентре можно только случайно. По-видимому, такого случая не было.

Но хорошо известно, как это происходит. Мощные цунами возникают при внезапных сильных опусканиях значительных участков дна океана. Вслед за дном опускается весь толстый слой воды, расположенный над этим участком. В этом вся разница. Камень приводит в движение лишь небольшой объем воды, сообщает ей лишь малую порцию энергии. При этом возникают маленькие волны, их движение с большой точностью описывается линейным уравнением.

Землетрясение вводит в игру огромную энергию. Возникают гладкие волны, длина которых намного превышает глубину океана. Законы движения волн при этом оказываются нелинейными. Возникает солитон. Его особенностью является то, что он «помнит» обстоятельства своего рождения. Это солитон-впадина, кольцевая волна, обращенная вершиной вниз. Когда солитон-впадина разбежится, поверхность океана выровняется и даже немного вспучится, чтобы снова опуститься вниз. И так несколько раз.

По поверхности побегут странные, очень пологие и совсем не высокие одиночные волны, вершины и впадины которых бегут на большом удалении одна от другой. Корабли обычно не замечают этих небольших и очень гладких волн. Даже в безветренную погоду их маскирует зыбь — спокойные гладкие волны, остатки удаленных штормов.

Нелинейные свойства, присущие распространению волн, длина которых много больше глубины воды, приводят к тому, что скорость распространения волны увеличивается вместе с энергией, заключенной в волне. Поэтому первая, наиболее мощная волна бежит быстрее остальных, а вторая волна обгоняет третью. Ясно, что расстояние между отдельными

волнами цунами возрастает по мере их удаления от места зарождения.

Лишь несколько первых мощных колебаний водной массы порождает солитоны-цунами. После того как основная часть энергии, освобожденной землетрясением, окажется израсходованной, остальные волны станут обычными, постепенно ослабевающими волнами. Обычными в том смысле, что их амплитуды уже не достаточны для того, чтобы выйти за пределы линейных законов распространения волн. Поэтому они затухнут после небольшого пробега.

Цунами становятся свирепыми там, где они особенно опасны, у берегов. Будучи солитонами, они без труда преодолевают огромные расстояния. Разрушительные цунами, обрушившиеся на Японию и Курильские острова вскоре после войны, зародились в результате опускания морского дна в районе Южной Америки.

Цунами лишь в одном проявляют некоторое благородство. Они не бросаются на берег без предупреждения. Незадолго до прихода цунами вода отступает, океан мелеет. Прибрежные воды скатываются в обращенную вершину цунами. Опытные прибрежные жители знают, что нужно немедленно бежать на возвышенности. На бегство обычно дается 10–15 минут. Затем с грозным ревом и с нарастающей скоростью на берег надвигается волна. Она растет на глазах, потому что набегающая волна не помещается над поднимающимся прибрежным дном. Если цунами попадает в сужающуюся бухту, оно становится особенно ужасным. Берега сжимают волну с обеих сторон, и ее гребень становится еще выше. Набежав на берег, вода на мгновение останавливается и, все более ускоряясь, возвращается в океан, унося с собой все, что способно двигаться. Через некоторое время из океана вырастает вторая, менее мощная волна, а за ней, постепенно слабея, еще несколько.

В 1848 году астроном-любитель У. Парсонс (впоследствии лорд Росс) построил огромный телескоп и обнаружил спиральную структуру многих галактик. Он сразу обратил внимание на их сходство с поверхностью воды в водовороте, но не смог найти объяснение этому сходству. Теперь нам ясно, что их возникновение связано с нелинейностью сил тяготения, определяющих взаимодействие всей иерархии космических объектов, от свободных атомов и пылинок до галактик и скоплений галактик.

Давно известно, что Большое красное пятно на поверхности планеты Юпитер существует, возможно, миллионы лет. Ученые считают, что Большое красное пятно — это особый вращающийся солитон — антициклонический вихрь, вращающийся вокруг собственной оси в сторону, противоположную вращению планеты. (Так вращаются и атмосферные солитоны — антициклоны — на Земле.)

Такой солитон удалось смоделировать в лаборатории. Он возникает в тонком слое жидкости, находящемся на дне вращающегося сосуда. Большое красное пятно Юпитера поддерживает свое существование за счет энергии, поступающей из связанных с ним масс атмосферы планеты.

Подобные устойчивые двумерные солитоны существуют и на Земле, в водах некоторых районов Мирового океана. Они называются двумерными потому, что их поперечные размеры много больше толщины слоев воды, участвующих во вращении этих почти плоских вихрей.

Разрушительные смерчи, о которых уже говорилось, являются настоящими солитонами, что позволяет им существовать сравнительно долгое время, не разрушаясь при встрече с неровностями на поверхности земли.

Идеи солитонов находят применение и в микрофизике. Сейчас рассматривают возможность описать свойства элементарных частиц, как солитонных решений нелинейных уравнений полей, передающих взаимодействия в микромире.

Идеи, связанные с солитонами, как и со странными аттракторами, еще очень молоды. Они с юношеской энергией проникают в различные области науки.

У тайны жизни

Нелинейная теория колебаний недавно обогатилась еще одним направлением развития. Оно, пожалуй, впервые позволило приблизиться к пониманию того, как и при каких условиях возможно возникновение порядка из беспорядка в живой природе, как возникла жизнь.

Нет, пожалуй, другой тайны, которая волнует большее количество людей, чем эта тайна. Вероятно, каждый человек хотя бы один раз задумался о тайне жизни. Было время, когда ею монопольно владели служители культов. Но эти времена давно миновали. Сейчас даже религиозные люди не довольствуются догматом творения.

Философы, главным образом натурфилософы, искали пути к этой тайне, но не преуспели.

Философы знают, что из слов не рождаются научные истины. Научные истины возникают из исследования природы, из опытов и обобщения полученных результатов, из их анализа при помощи математики. Даже марксистская политэкономия построена с применением математики.

Но возвратимся к происхождению жизни. Советский академик А. И. Опарин создал глубокую теорию происхождения жизни. В соответствии с этой теорией жизнь возникла из неживого «бульона», скопления органических молекул в районах теплых мелководий древних морей. А эти органические молекулы возникли из неорганических соединений под действием солнечного света и молний.

Лабораторные опыты подтвердили эту часть теории. В замкнутые сосуды, полностью свободные от любых живых существ, в том числе от простейших одноклеточных, помещали различные комбинации разнообразных неорганических соединений. Затем тщательно проверяли, не попали ли туда случайно органические молекулы. Убедившись, что их нет, в течение длительного времени пропускали высоковольтные электрические заряды между электродами, предварительно впаянными в стенки сосудов, — один конец электрода снаружи, второй — внутри.

В сосуде под действием этих микромолний происходили различные химические реакции. Последующий химический анализ обнаруживал и идентифицировал молекулы, возникшие в ходе опыта. В большинстве случаев появлялись известные ранее неорганические молекулы. Но из некоторых исходных составов со временем появлялись и органические молекулы, даже такие сложные, как аминокислоты — неперенные кирпичики, входящие в состав живых существ.

Такие опыты подтвердили, что теория Опарина ведет по правильному пути, но ни живые существа, ни даже белковые молекулы таким простым путем не возникали.

Вопрос о том, как возникло живое, оставался открытым. Но наука на этом не остановилась.

Еще и сейчас на Западе ряд ученых, они называют себя виталистами (от латинского *vitalis* — жизненный), считают, что живое отличается от неживого присутствием в живом особой жизненной силы. На вопрос о том, что такое жизненная сила и как она возникает, они отвечают сложными рассуждениями, суть которых состоит в том, что жизненная сила присуща живым организмам и передается от предков к потомкам. То, что жизнь передается от предков к потомкам, конечно, верно, но это не поясняет, что же такое жизненная сила и что, передаваясь потомкам, делает их живыми.

Биологи, изучающие живые организмы, сходятся на том, что в основе жизни, в основе процессов, сопровождающих жизнь, лежат химические процессы. Но вопрос о том, как известные, изученные химические процессы превращаются в биологические процессы, остается открытым.

Читатель вправе сказать, что все это хорошо известно, и спросить: какое отношение это имеет к нелинейным процессам?

Сейчас мы посмотрим, как нелинейная теория колебаний вплотную подошла к тайне жизни. Тайна превращения хаоса в порядок уже перестала быть тайной. Но главная тайна — тайна возникновения жизни еще продолжает бросать вызов ученым.

Известно, что двигаться к истине легче, если идти постепенными шагами. Часто добивается успеха тот, кто умеет правильно ставить вопросы. Вопрос, поставленный правильно, содержит в себе часть ответа, путь к ответу или хотя бы направление, в котором следует искать ответ.

Когда речь заходит о жизни и смерти, когда нужно определить, жив ли человек или животное, прежде всего возникает вопрос: сохранилось ли дыхание, бьется ли сердце? Жизнь высших существ невозможна без дыхания и сердцебиения. Без сложной периодической работы мышц, осуществляющих эти процессы. Реакция живого организма на внешние условия, нагрузку — физическую и умственную, — на эмоции, боль, на многое другое, автоматизм дыхания и сердцебиения — все это продолжает поражать наше воображение.

Почему и как происходят эти сложные процессы? Виталисты, конечно, ссылались на жизненную силу. Медики обнаружили специальный орган, управляющий работой сердца — синусовый узел. Он посылает периодические нервные импульсы в особую область сердца — узел Гисса, который распределяет эти импульсы по сердечной мышце так, чтобы по очереди согласованно сокращались предсердия и желудочки сердца, образующие этот живой насос совершающий ежедневно около 100 000 рабочих циклов, более 30 миллионов циклов в год. Но и сейчас осталось невыясненным, что и как определяет периодическую работу синусового узла, что и как управляет дыханием. В биологию вошел термин «биологические часы», а потом, когда выяснилось, что в организме протекают и другие периодические процессы, появился и новый термин — «биоритмы».

Разумные медики, не верящие в существование пресловутой жизненной силы и понимающие, что биологическая жизнь основана на сложных химических процессах, считают, что и биологические часы являются видимой реализацией каких-то химических процессов. Следует выяснить — каких.

Но химики не могли с этим согласиться. Они давно установили, что все химические реакции развиваются однонаправленно, что скорость химической реакции определяется произведением концентраций реагирующих веществ и по мере истощения хотя бы одного из них скорость химической реакции уменьшается.

Уверенность химиков в том, что периодические химические реакции невозможны, сильно укрепилась, как это ни парадоксально, после работы А. Лотка, который в 1910 году объявил, что такие реакции могут существовать. И разработал математическую модель колебательной химической реакции. Эта модель основана на хорошо известном химикам законе действующих масс, установленном в количественной форме в шестидесятых годах прошлого века К. Гульдбергом и П. Вааге.

Лотка предложил простейшую схему реакций, включающих одну автокаталитическую стадию. Автокаталитической называется химическая реакция, продукт которой является катализатором этой реакции. Значит, по мере накопления продукта реакции скорость реакции возрастает, несмотря на уменьшение концентрации реагирующих веществ. Эта модель описывает затухающие колебания концентраций. Затухание обусловлено тем, что по мере расхода исходных реактивов их концентрация уменьшается и закон действующих масс пересиливает влияние автокатализа. Таким образом, эта модель ведет себя как маятник, выведенный из состояния равновесия и предоставленный самому себе.

В 1920 году Лотка усовершенствовал свою модель, введя в нее вторую автокаталитическую стадию, после чего она могла описывать незатухающие колебания концентраций реагирующих химических веществ.

Однако многочисленные настойчивые попытки химиков реализовать колебательную химическую реакцию не привели к цели. Это лишь укрепило уверенность химиков в том, что скорость химических реакций неизбежно определяется законом действующих масс, то есть концентрациями реагирующих веществ, и что привлечение автокаталитических реакций не нарушает монотонного уменьшения скорости химических реакций.

Загадка биоритмов оказалась надолго зачисленной в категорию неразрешимых.

Однажды проблемой периодичности сердцебиения заинтересовался физик. Тот, кто впервые построил теорию лампового генератора радиоволн. Ван дер Поль со своим сотрудником ван дер Марком задумались над тем, можно ли воспользоваться ламповым генератором как моделью сердца. Конечно, речь шла не о попытке замены сердца генератором. Они задумали смоделировать то, что отличает сердце от других органов живого организма. Смоделировать периодичность работы сердечной мышцы, периодическое возникновение нервных импульсов в синусовом узле. Им было ясно, что обычный ламповый генератор слишком прост для того, чтобы служить моделью такой сложной системы, как сердце. Простой ламповый генератор может пребывать только в двух состояниях — в состоянии покоя или состоянии периодических колебаний. Обычно состояние покоя лампового генератора неустойчиво и случайные флуктуации возбуждают в нем колебания, амплитуда которых быстро растет, приближаясь к амплитуде устойчивых периодических колебаний. Это, конечно, напоминает свойства сердца, начинающего свои колебания еще до рождения и продолжающего их в течение всей жизни. Способность лампового генератора возвращаться к определенному режиму периодических колебаний тоже напоминает способность сердца возвращаться к нормальному ритму после того, как этот ритм ускорится под действием нагрузки или замедлится во время сна.

Но исследователи знали, что врачи наблюдают различные отклонения сердечного ритма от нормы, связанные с тем или иным заболеванием. Простейшее отклонение — ненормально медленное возвращение к обычному ритму после снятия нагрузки. Более сложные и даже опасные отклонения проявляются в разнообразных нарушениях сердечного ритма: пропуски в сердечных сокращениях, одиночные или повторяющиеся в различных комбинациях, внезапные ускорения ритма или переход от обычных сокращений сердечной мышцы к смертельно опасным трепетаниям — фибрилляциям, при которых сердце перестает перекачивать кровь. В начале двадцатых годов врачи уже зафиксировали у людей 21 вид сердечных аритмий.

Для того чтобы модель могла воспроизводить эти режимы работы сердца, ван дер Поль и ван дер Марк усложнили схему лампового генератора и, соответственно, усложнили уравнения, описывающие процессы, происходящие в генераторе. В результате им удалось воспроизвести все известные в то время виды аритмий и еще два неизвестных вида. Впоследствии, после создания совершенных электрокардиографов, медикам удалось обнаружить у человека не только эти два но и, к сожалению, еще несколько типов аритмий. Дальнейшее усложнение модели позволило воспроизвести их.

Врачи скептически отнеслись к этой работе физиков ставшей первой в числе многих работ по применению радиотехники и электроники в медицине. Ведь эта работа позволила лишь смоделировать динамику, описать уравнениями один из параметров работы сердца. Таким параметром может быть давление в полостях сердца, смещение какой-нибудь точки сердечной мышцы и т. п. Эта модель, эти уравнения, описывающие работу модели, не позволяли ответить ни на один из вопросов, существенных для медиков: каким образом происходит ритмическая работа синусового узла, как он управляет сокращениями сердечной мышцы, почему возникают нарушения работы сердца, как их предупреждать, как их лечить?

Тайна работы сердца и тайна биологических часов оставались неприступными. Они продолжали интересовать многих. Многие чувствовали, что основа скрыта в химии, но химики сознавали свое бессилие.

Колебания в химии

Так продолжалось до середины нашего века, когда студент-физик, со школьных лет интересовавшийся тайнами жизни, не узнал мнения химиков и причину их пессимизма. Он, по-видимому, не знал афоризма, приписываемого Эйнштейну. Суть афоризма: все знают, что сделать что-то невозможно; потом приходит невежда, не знающий, что это невозможно, и делает это.

Может быть, на него повлияли лекции по химии или книги, излагающие созданную Н. Н. Семеновым теорию цепных реакций, скорость которых не затухает, а возрастает как это бывает при взрыве. Может быть, его вдохновили лекции и книги о теории колебаний, о теории нелинейных колебаний. Может быть, дело в молодости, хотя через это прошли и другие.

Во всяком случае, Анатолий Жаботинский начал искать в литературе описание химических реакций, которые не затухают, как обычно. Ряд таких реакций был описан и изучен, и среди них были периодические химические реакции. Самая известная из них — поющее пламя. Газ, горящий на конце трубки, иногда начинает звучать. При этом яркость пламени периодически изменяется в такт со звуковыми колебаниями. Как говорят в детской игре — тепло, но не больше. Процесс, приводящий к возникновению поющего пламени, хорошо изучен. При некоторых скоростях течения газа в нем возникают турбулентные вихри, они вызывают изменения давления и скорости течения газа. Здесь в игру вступает труба, она превращается в подобие органной трубы, звучание которой тоже связано с образованием вихрей, срывающихся в районе ее выходного отверстия. Колебания воздуха в трубе воздействуют на процесс образования вихрей, навязывая им свой ритм. Воздух, текущий в органной трубе, и газ в поющем пламени приносят энергию, необходимую для образования вихрей. Так возникает обратная связь, необходимая для того, чтобы процесс стал самоподдерживающимся. Нелинейные свойства процесса сильного сжатия газа необходимы для того, чтобы колебательный режим был устойчивым, устойчивым по амплитуде (по величине) колебаний. Пламя в поющих пламенах увеличивает температуру в зоне горения и способствует проявлению нелинейных свойств газа при меньших давлениях и скоростях течения, чем в случае органной трубы, где воздух холодный.

Таким образом, свойство периодичности поющих пламен порождается не горением, не химическим процессом а физическими свойствами трубы. Способностью газа в трубе совершать периодические резонансные колебания. Здесь горящий газ — лишь источник энергии.

Во всех других описанных в литературе периодических химических реакциях ситуация была аналогичной: периодичность процесса задается не особенностями химических реакций, а сопутствующими физическими явлениями.

Задача казалась безнадежной, когда профессор С. Э. Шноль сообщил Жаботинскому, что в редком издании «Рефераты по радиационной медицине за 1958 г.», название которого не могло заинтересовать тех, кто не работает в области радиационной медицины, а интересуется редкими химическими реакциями, содержится краткий реферат сообщения Б. П. Белоусова об открытой им периодической химической реакции.

Много позже журналисты заинтересовались личностью Белоусова и рассказали о его жизни и его открытии. О подлинной драме, разыгравшейся в химической лаборатории и вокруг нее. Талантливый химик, Белоусов, добившийся многих выдающихся научных результатов, неожиданно обнаружил, то есть открыл, химическую реакцию, протекающую периодически. Он исследовал ее в лучших традициях аналитической химии и направил соответствующую статью в химический журнал. Редколлегия журнала, по-видимому зная, что периодических химических реакций не может быть, возвратила статью автору. Как здесь не вспомнить аргумент чеховского героя: не может быть потому, что не может быть никогда. В химии никто не доказал, что периодической химической реакции не может быть. Но все знали, что еще никогда и никому не удавалось ее наблюдать. Белоусов ее наблюдал и поэтому послал статью в другой журнал. Она возвратилась и из этого весьма авторитетного журнала. Белоусов, как некоторые другие крупные ученые, не был свободен от слабостей. Он решил поставить крест на этой статье, на этой работе никогда к ней не возвращаться. К сожалению, он выполнил свое решение.

Но его открытие не кануло в Лету. О нем помнил Шноль. О нем прочитал Жаботинский. В кратком реферате содержались сведения, достаточные, чтобы воспроизвести реакцию.

Нужно было приготовить три определенных бесцветных раствора, затем слить их в одну колбу и взболтать. Жаботинский проделал это, и перед его глазами возникло чудо. Бесцветная жидкость потемнела, затем снова стала прозрачной, как вода, и снова потемнела. И так продолжалось сотни раз без заметных изменений периода, без видимых изменений степени потемнения раствора в каждом цикле. Именно это описал Белоусов. В реферате не содержалось ни объяснения, ни дальнейших подробностей.

Впрочем, Жаботинский и без того был подготовлен знакомством с описаниями исследований других периодических реакций. Следовало проверить, действительно ли периодичность проистекает вследствие специфики химических реакций, идущих в колбе, или она вызывается посторонними причинами, например некими невыявленными физическими процессами?

Начался длительный придирчивый поиск. Прежде всего, не влияют ли на ход реакции какие-либо свойства стенок колбы? В колбе из чистого кварцевого стекла все происходило так же, как в колбе из обычного химического стекла. В колбу был засыпан песок, затем мелкодробленое стекло. Поверхность соприкосновения жидкости со стеклом увеличивалась в тысячи раз. Периодическая реакция протекала как в чистой колбе.

Один эксперимент шел за другим. Проверялись различные варианты. Реакция Белоусова выдерживала все испытания. Росла уверенность: Белоусов нашел то, что не удавалось другим, открыл истинно химическую периодическую реакцию. Оставалось изучить, как свойства реакции зависят от соотношения концентраций реагирующих реактивов, от температуры, от размеров колбы. В лаборатории побывали многочисленные сотрудники, прослышавшие о чуде. Теперь поток иссяк. Начиналась будничная работа. Она, как полагается, закончилась написанием статьи, обсуждением полученных результатов на семинаре. Конечно, пришлось отвечать на множество вопросов, выслушать различные мнения. Это в порядке вещей.

Статья, излагающая исследования, установившие, что реакция Белоусова является чисто химической периодической реакцией, была написана так, что рецензенты и редколлегия приняли решение: опубликовать.

Так реакция Белоусова вошла в науку, а его имя вошло в историю науки.

Как это всегда бывает, за первым шагом последовали другие. Жаботинский обнаружил и изучил несколько классов периодических химических реакций, аналогичных реакции Белоусова. Ведь теперь было известно, где следует искать. Он установил, как протекают эти реакции, где в химии скрыта возможность возникновения периодичности. Когда секрет открыт, он исчезает. Все выглядит просто и ясно.

Для того чтобы химическая реакция стала периодической, в составе реагентов должны присутствовать вещества, способные вступать в реакцию двух типов. Один из них должен быть автокаталитическим: продукты, возникающие в ходе реакции, должны иметь свойства катализатора ускоряющего эту реакцию. Это автокаталитическая (сама себя катализирующая, ускоряющая) реакция, подобная цепным реакциям Семенова, аналогичная той, о которой в 1910 году писал Лотка. Одновременно должны накапливаться продукты другого типа, подавляющие эту реакцию — химики называют их ингибиторами. Когда количество ингибитора достигает некоторого определенного малого предела, автокаталитическая реакция оказывается подавленной. Теперь нужна реакция, устраняющая ингибитор. Стоит концентрации ингибитора уменьшиться до определенного малого предела, как вновь начинается автокаталитическая реакция, — и все повторяется вновь и вновь, пока хотя бы один из реактивов не окажется израсходованным.

Это были настоящие химические часы! Роль энергии гири играет запас химической энергии реагентов, а роль маятника — чередование автокаталитической и ингибиторной стадий. Часы с гирями или пружиной нуждаются в том, чтобы их заводили. Химические часы в колбе тоже нуждаются в подведении энергии извне, в замене реактивов. Но химическую реакцию можно сделать проточной. В случае реакции Белоусова для этого достаточно подавать в колбу реактивы из трех больших сосудов, обеспечить их смешение и

вытекание прореагировавшей жидкости. При этом периодическая химическая реакция продолжается сколь угодно долго.

Публикации Жаботинского вызвали интерес химиков и биофизиков. Химиков интересовали возможности практического применения. Биофизики увидели первый подход к тайне биологических часов. Появились последователи. Реакция получила новое название: реакция Белоусова — Жаботинского. Только Жаботинский по-прежнему называет ее реакцией Белоусова.

Но не напрасно Жаботинский учился на Физическом факультете МГУ, где ученые активно следовали традициям, заложенным Мандельштамом, поддерживали и развивали «колебательную культуру», применяли методы Общей теории колебаний к исследованию принципиальных проблем и задач практики.

АВТОВОЛНЫ

Жаботинский понимал, что периодическую химическую реакцию необходимо изучать методами нелинейной теории колебаний. Для этого следовало прежде всего разработать метод перехода от уравнений, применяемых химиками, от их химической символики к настоящим математическим уравнениям.

Он разработал необходимый метод. Теперь химические уравнения породили уравнения нелинейной теории колебаний. Ничего иного не могло быть. Уравнения описывали шаг за шагом, как энергия, вносимая в реакционный объем самими реактивами, энергия, запасенная в их молекулах, без вмешательства извне порождает периодическую реакцию, периодический процесс.

Уравнения показали, а эксперимент подтвердил, что в химических реакциях возможны и могут быть реализованы аналоги всех явлений, хорошо изученных в радиотехнике. Химические реакции протекали плавно, как процессы в генераторе ван дер Поля, когда концентрации реагирующих веществ изменялись по закону синуса. Или демонстрировали пилообразную зубчатую кривую, свойственную простому генератору, состоящему только из конденсатора, сопротивления и неоновой лампы. Можно в широких пределах изменять период химической реакции, периодически воздействуя на нее дополнительным химическим реактивом или даже периодическими вспышками света. Физики и радиоинженеры называют такое воздействие захватом периода генератора внешней силой. Возможен захват периода одной реакции при воздействии на нее другой химической реакции, имеющей другой период. Физики и инженеры называют это взаимной синхронизацией генераторов. Вряд ли следует перечислять другие аналогии.

Но это далеко не все. До сих пор речь шла о химических реакциях, протекающих одинаково во всем реакционном сосуде. Эти реакции описывают при помощи обыкновенных дифференциальных уравнений. Методы нелинейной теории колебаний, как известно, применимы к процессам, являющимся едиными, но протекающим несколько по-разному в различных областях пространства. Мы уже обсуждали процесс возбуждения струны смычком, при котором размахи колебаний струны закономерно изменяются от ее концов к середине. Подобные процессы возникают в органических трубах и поющих пламенах. Для их описания необходимы более сложные дифференциальные уравнения, включающие в себя описание зависимости процесса как от времени, так и от места в пространстве.

Жаботинский начал новые исследования, убежденный, что процессы такого рода возможны и в химических системах. Он составил необходимые более сложные математические уравнения, и они подсказали, где следует искать, как создать условия для возникновения неизвестных химических процессов. Углубленные исследования завершились очередным открытием. Совместно с аспирантом А. Н. Заикиным он открыл то, что искал. Теперь реакция шла иначе. Она не охватывала одновременно всего объема реагирующей смеси. В сосуде возникали и распространялись волны — волны окраски, волны концентраций реагирующих компонентов. Впоследствии академик Р. В. Хохлов назвал их

автоволнами, то есть волнами, которые возбуждают и поддерживают сами себя. Это название не ограничивается волнами концентраций химических веществ. Аналогичные волны существуют в экологии, в лазерной технике, в плазме, в полупроводниковых материалах и структурах и во многих других областях, включающих новые эффективные технологические процессы. Химические автоволны обладают внешним отличием от обычных волн. Они разбегаются не увеличивающимися кругами, а подобны раскручивающимся спиральям. Иногда из общей малой области разбегаются по нескольким спиральям.

Примерно в то же время, когда Жаботинский исследовал химические колебания, над развитием термодинамики работал И. Р. Пригожий.

Илья Романович Пригожий — один из интереснейших ученых современности. Он родился в 1917 году в Москве, но жизнь его родителей сложилась так, что он оказался в Бельгии. Стал в 1953 году членом Бельгийской академии наук, а в 1969 году ее президентом. С 1962 года он директор Международного института физики и химии, с 1967 года — директор Центра статистической механики и термодинамики Техасского университета в США.

Работая в области термодинамики и физической химии, он провел ряд существенных исследований по теории необратимых процессов.

Его вклад в науку — «теория Пригожина», «критерий Пригожина» и многое другое — сделал его одним из ведущих ученых, нобелевским лауреатом 1977 года. С 1982 года он иностранный член АН СССР.

Надо сказать, что ко времени описываемых событий несколько ученых заметили, что применимость классической термодинамики ограничена процессами, протекающими очень медленно, при небольших различиях температур разных частей изучаемой системы. Однако природа знает, а техника создает процессы, характеризующиеся огромными разностями температур: работа паровой машины, горение, взрывы, процессы на Солнце и многое другое. Как же протекают эти процессы, как они управляются?

Начиная с Карно, ученые заменяли эти процессы модельными медленными процессами, протекающими при малых разностях температур. Но с развитием техники и с необходимостью более точного описания природных явлений и технических процессов такой подход оказался недостаточным. Начались попытки решать отдельные задачи без использования подобных упрощений. Возникла термодинамика неравновесных процессов, неравновесная термодинамика. Существенную роль в ее развитии сыграл Пригожий и его сотрудники.

Химические автоколебания и автоволны оказались прекрасным случаем применения неравновесной термодинамики, а неравновесная термодинамика стала дополнительным орудием исследования химической динамики и периодических явлений в биологии.

Так еще в одном случае проявилось единство науки. Термодинамика и теория колебаний, возникшие из различных источников и длительное время развивавшиеся независимо, объединились, способствуя ускорению развития многих других областей науки, например совсем молодой экологии.

Еще в 1931 году математик В. Вольтерра заинтересовался проблемой сосуществования хищников и жертв. И придумал задачу. Ее действующие лица — волки и зайцы, щуки и караси и многие другие пары. Исходные условия: жертвы снабжены неограниченным запасом пищи, хищники питаются только своими жертвами. И те и другие развиваются по законам своего вида — конечно, при учете количества необходимой им пищи. В данном случае жертвы не ограничены пищей, что упрощает задачу. Спрашивается, как эти виды могут сосуществовать?

Вольтерра составил уравнения, описывающие поставленную задачу и включающие указанные условия. Это были обыкновенные, но нелинейные дифференциальные уравнения. Тем самым предопределялось, что решения уравнений будут описывать одновременное изменение численности хищников и жертв по всей занятой ими территории, подобно тому

как первоначальная реакция Белоусова охватывает сразу весь реакционный объем. Вольтерра, по-видимому, не знал, что его уравнения, по существу, совпадают с уравнениями, которые получил Лотка для своей второй модели с двумя автокаталитическими стадиями. Не знал и о поразительном совпадении: Лотка еще в 1920 году уже применил свои уравнения к задаче о хищниках и жертвах! Такие случаи не редки в истории науки.

После того как Жаботинский описал реакцию Белоусова математическими уравнениями, стало ясно, что они имеют сходство с уравнениями Вольтерра. Сходны и решения. Какова бы ни была исходная численность хищников и жертв, она не может оставаться постоянной. Если хищников первоначально не много, а жертв много, то хищники будут быстро размножаться и уничтожать все большее количество жертв. В конце концов жертв станет так мало, что хищники будут умирать от голода. Их количество уменьшится. Возрастет численность жертв, при этом будут увеличиваться пищевые ресурсы хищников, и все начнется сначала. Каким бы ни было начальное состояние, результат окажется одинаков — периодическое изменение численности хищников и жертв, причем моменты их максимальной численности сдвинуты во времени, а величина колебаний численности тех и других постоянна.

Задача Вольтерра может быть усложнена введением различных дополнительных условий, например зависимостью наличия пищи жертв от их численности, введением третьего вида, питающегося той же пищей, но обладающего другими темпами размножения, и т. п.

При определенных условиях могут возникать волны численности, когда число особей данного вида изменяется не только во времени, но и в пространстве, по территории обитания. Так возникают экологические волны. Их действительно удалось обнаружить в бактериальных препаратах.

Экологические колебания и волны могут возникать как результат хозяйственной, а иногда бесхозяйственной деятельности человека, когда его вмешательство нарушает процессы, сложившиеся в природе. Такие случаи зафиксированы, например, в рыболовстве. Все это — закономерные, впечатляющие связи чистой науки с обычной жизнью.

Жаботинский и Заикин обнаружили важную особенность химических автоволн. Для возникновения автоволн необходимо, чтобы каждый малый объем среды был способен испытывать самопроизвольные периодические колебания концентрации химических реагентов. В этом случае говорят, что среда является автоволновой, или, иначе, активной средой. В такой среде удалось выявить неизвестный ранее механизм возникновения и развития автоволн. Оказывается, концентрационные колебания, способные возникнуть в любой точке химической автоволновой среды, возникают в ней не всюду одновременно. Вследствие хаотических тепловых движений молекул реакция может по закону случая возникнуть сначала в одном небольшом объеме. Ее продукты, распространяясь по закону случая подобно молекулам краски, внесенной в какую-нибудь точку раствора, будут вовлекать в реакцию соседние области раствора. Так возникает спиральная волна реакции, волна концентрации реагентов, способная пробежать через весь объем реактора. Если случайно подобные волны возникнут независимо в различных точках сосуда (эти точки получили название ведущих центров), то волны, бегущие от различных ведущих центров, неизбежно встретятся и в месте встречи погасят одна другую. Так объем окажется разделенным на отдельные меньшие объемы, внутри которых существуют изолированные волны, исходящие из своих ведущих центров. Так среда, первоначально однородная, окажется разбитой на зоны, по существу изолированные одна от другой. Процессы, происходящие в них, будут протекать независимо. Это первый намек на то, как в теории Опарина из однородного первичного бульона могли выделиться изолированные химические структуры, впоследствии способствовавшие возникновению живых клеток.

Развитие физико-химии автоволн неожиданно коснулось жизненно важной области. Физики обнаружили, что автоволны могут развиваться в сердечной мышце. Мы знаем, что сокращения здорового сердца управляются нервными импульсами, вырабатываемыми

синусовым узлом. Но оказалось, что в сердечной мышце могут возникать ведущие центры, порождающие автоволны, независимые от синусового узла. Так возникают нарушения сердечного ритма.

Модель сердечных сокращений, основанная на уравнениях химической динамики, много ближе к процессам, протекающим в сердце, чем модель ван дер Поля и ван дер Марка. Она позволила перейти от обыкновенных дифференциальных уравнений к уравнениям в частных производных, описывающих протекание процессов не только во времени, но и в пространстве. Она позволила привлечь к моделированию сердца не только представления о нелинейных колебаниях, но и представления об автоволнах и ведущих центрах, о странных аттракторах. Медики вместе с физиками сумели экспериментально изучить спиральные волны возбуждения, появляющиеся в работающем сердце при возникновении аритмий. Математическая модель, основанная на учете автоволн, способна описать даже возникновение фибрилляций. Они могут явиться следствием хаотического возникновения и исчезновения ведущих центров или результатом возникновения в сердечной мышце странного аттрактора.

Новая модель уже нашла применение в поиске и синтезе лекарств, предупреждающих и подавляющих опасные сердечные аритмии. Но это лишь очередной шаг в начале трудного пути познания периодических процессов в живых организмах.

Общая теория колебаний породила новый стиль физического мышления, основанный на учете глубокого единства процессов, внешне весьма различных, относящихся к разнообразным областям науки, но допускающих описание их свойств при помощи однотипных математических уравнений. Ученый, воспринявший этот стиль мышления и обладающий опытом в одной из конкретных областей науки, способен быстро и успешно входить в другие, часто весьма удаленные научные проблемы и более легко получать в них новые результаты.

Области применения Общей теории колебаний, в частности ее младшего ответвления — химической динамики, постоянно расширяются, захватывая все новые направления науки и техники.

ГЛАВА 5

МИРАЖИ ВСЕЛЕННОЙ

Всегда познавайте предмет в противоречиях.

Б. Шоу

Земля и звезды

Мир, в котором мы живем, всегда представал перед человеком в величии и таинственности. Взаимосвязь причин и следствий интересовала наших предков еще во тьме пещер. Искры, высеченные из кремня, почти всегда зажигали сухой мох или тонкие веточки. Огонь мог обжечь, но и улучшал качество пищи. Дальность полета стрелы определялась усилием приложенным для натяжения тетивы лука, и силой ветра...

Древнейшие народы всех континентов оставили нам в наскальных изображениях, а позднее в записях свидетельства особого интереса человека к небесным явлениям. Неизменная последовательность дней и ночей, повторяющаяся картина звездного неба воплотились в представление о вечности, противостоящей мимолетности событий, происходящих на Земле. Старинные летописи донесли до нас сообщения о появлении и движении комет, о вспышках недолговечных ярких звезд. Во всех случаях летописцы

ограничивались описанием. Не требовалось большой наблюдательности, чтобы заметить, как изменяется длительность дня и ночи, установить связь этих изменений с переходом от зимы к лету и обратно. Ощущение течения времени, возникшее в незапамятные времена, постепенно отождествлялось с движением Солнца, Луны и звезд.

Тот, кто овладел способностью сопоставлять события, не мог не обратить внимание на движение Луны среди звезд и циклические повторения ее формы от диска к тонкому серпу, раз за разом изменявшему направление своих рогов, перед тем как начать расширяться и округляться.

Звезды тоже отличались одна от другой. Разница не ограничивалась яркостью и цветом. Некоторые описывали по небосводу небольшие круги. У других эти круги были больше. У третьих круги обрывались у горизонта. Те, кто систематически наблюдал движение светил, а это были вожди или жрецы, руководившие жизнью общины, установили, что некоторые звезды выходят из-за горизонта только зимой, а летом они не видны. Они выделили и пять ярких немерцающих звезд, перемещавшихся ночь от ночи среди остальных звезд. Две из них, в том числе самая яркая, были видны только на заре, вечерней или утренней. Другие три перемещались между звездами с различной скоростью, иногда описывая среди них петли. Греки называли эти пять звезд планетами (слово «планетес» означает по-гречески «блуждающая»).

Нужно обладать способностью сопоставлять и анализировать, чтобы задуматься о причинах небесных явлений. Древнейшие народы ограничивались сопоставлением, не заботясь о выяснении причин. Так, в Древнем Египте первое в году появление из-за горизонта яркой звезды, которую мы теперь называем Сириусом, было сопоставлено с ежегодным разливом Нила.

Великий греческий астроном Птолемей, воспринявший многое от египтян, от жителей Вавилона и от шумеров создал систему, хорошо описывающую все видимые движения небесных тел. Система Птолемея (сейчас мы назвали бы ее моделью) позволяла с большой точностью предсказывать покрытия звезд Луной, сближение планет с яркими звездами и даже затмения Луны и Солнца.

В древности люди думали конкретно. Они считали понятным только то, что можно было, хотя бы мысленно представить в виде каких-либо предметов или устройств. Система Птолемея состояла из многих незримых хрустальных сфер. Они вращались вокруг столь же незримых осей. К внешней сфере были прикреплены звезды. Они вращались вместе с ней, не перемещаясь одна относительно другой. К отдельным внутренним сферам были прикреплены Солнце, Луна и планеты. Их связывала сложная система, обеспечивавшая видимые перемещения Солнца, Луны и планет относительно неподвижных звезд. Кометы, недолговечные новые звезды и множество мимолетных падающих звезд оставались за пределами системы Птолемея.

Система Птолемея помогала осознать, как сложные видимые движения могут вечно повторяться, ибо древние ученые считали мир вечным.

Римский ученый Цицерон, прославившийся своим ораторским искусством, свидетельствует о том, что великий математик и механик Архимед воспроизвел систему Птолемея при помощи модели из металлических сфер с множеством отверстий и демонстрировал с ее помощью небесные явления аналогично тому, как их можно видеть в современных планетариях.

Вселенная вечна и неизменна — это убеждение залог не и в системе Коперника, сменившей систему Птолемея. Коперник, вопреки догмату церкви о сотворении мира, считал, что вращение планет вокруг Солнца, вращение Земли вокруг ее оси и вокруг Солнца и движение Луны не имеют ни начала, ни конца. «Не вечные» кометы, падающие звезды и неподвижные новые звезды все еще оставались за пределами астрономии.

Только Галилей осмелился высказать уверенность, что причина этих «не вечных» явлений лежит не в атмосфере Земли, а за ее пределами.

Не только Птолемей и Коперник, но и великий вычислитель Кеплер ограничивался

отображением хода небесных движений. Ни Птолемей, ни Коперник, ни Кеплер не только не объяснили, но даже не ставили вопроса о том, почему небесные тела перемещаются именно так, а не иначе. Как система Птолемея, так и система Коперника, даже после уточнения, введенного в нее Кеплером, была кинематической моделью, рассматривавшей небесные движения только с точки зрения геометрии и кинематики — этого простейшего раздела механики. Вопрос о силах, вызывающих эти движения, оставался за пределами астрономии.

Величайшим достижением Кеплера было установление трех законов, описывающих движение планет вокруг Солнца по эллиптическим орбитам. Этим он внес важное уточнение в систему Коперника, считавшего, что планеты движутся по окружностям.

Первым, кто начал ставить опыты с целью установить связь движения с силой, вызывающей рассматриваемое движение, был Галилей. Опыты Галилея и полученные им результаты стали одной из основ, на которой Ньютон построил здание динамики — раздел механики, связывающий силы с вызываемыми ими движениями. В основу вычислительной астрономии Ньютон положил три сформулированных им закона механики и установленный им закон всемирного тяготения. Исходя из этих законов и новых, созданных им, разделов математики, он мог вычислить все движения планет и их спутников. Это произвел ошеломляющее впечатление на современников, не только на ученых, но и на людей, далеких от науки.

Первое, а затем и последующие издания фундаментального труда Ньютона «Математические начала натуральной философии» были раскуплены, как теперь раскупаются бестселлеры, несмотря на то что само заглавие предупреждало: книга полна математики и посвящена натуральной философии (физике). В книге изложен новый метод исследования природы и множество новых выдающихся результатов, обогативших науку, в том числе астрономию.

Огромный труд, закончившийся в 1687 году изданием «Начал», не исчерпал интереса Ньютона к проблеме мироздания. Его смущали следствия, вытекающие из закона тяготения. Ему было ясно, что мир, имеющий любые, но конечные размеры, не может быть устойчивым. Даже если бы все вещество было первоначально равномерно распределено в ограниченном пространстве, то «вещество с краев пространства тяготело бы к внутреннему веществу и вследствие этого падало к середине всего пространства и там соединилось бы в большую шаровидную массу».

«Но, — пишет он дальше, — если бы вещество было равномерно рассеяно по бесконечному пространству, оно никогда не собралось бы в одну массу». Ньютон обдумал и эту ситуацию и, конечно, сразу обнаружил ее неустойчивость. Малейшее отклонение от равномерного распределения вещества должно дать толчок к разрушению такого распределения «И еще труднее вообразить, что все частицы в бесконечном пространстве располагались бы одна меж другими так точно, что оставались бы неподвижными в полном равновесии».

И поясняет свою мысль примером:

«Ибо я полагаю это столь же трудным, как заставить не одну, а бесконечное множество иголок (столько, сколько частиц в бесконечном пространстве) стоять в точном равновесии на своих остриях». Как совместить эти рассуждения с предположением о вечности или с догматом церкви о сотворении мира?

Ньютон не сумел найти выход из этих противоречий. Он оставил их в наследство потомкам, указав, что предположение о бесконечности Вселенной неизбежно ведет к тому что вещество в ней рано или поздно соберется во множество комков.

Небесная механика, как называли в то время вычислительную астрономию, стала основой трудов многих выдающихся физиков и астрономов, разрабатывавших все более совершенные вычислительные методы, необходимые для более точных астрономических расчетов. Но идейные основы, заложенные Ньютоном, оставались неизменными. Неизменно стоял и сакраментальный вопрос: с чего все это началось?

Ньютон, руководствуясь выдвинутым им правилом — не создавать гипотез, не касался

этого вопроса, он не видел возможности подступиться к этой проблеме.

Полученные им уравнения, однако, обладали удивительной силой. Они позволяли решить любую задачу астрономии, исходя из данных, почерпнутых из опыта в какой-то определенный момент времени. Имея такие данные, можно было рассчитать и будущее, и прошлое. Например, для Солнечной системы, где планеты и их спутники совершают периодические движения, поддаются вычислению их положения в сколь угодно далеком прошлом и будущем. Ньютона тревожила эта ситуация. На Земле, где нет ничего вечного, тоже происходит множество событий, поддающихся расчету и предсказанию. Приливы сменяются отливами. Чередуются времена года. Меняются русла ручьев и рек. Брошенные предметы падают на Землю. Но не все подчиняется законам механики. Почему нагретые тела остывают? Почему животные и растения рождаются и умирают? Как связано вечное с преходящим? Это были вопросы без ответа. Почему же его уравнения предписывали небесным явлениям вечное повторение?

Теория свидетельствовала о вечности Солнечной системы. Даже за пределами Солнечной системы, там, где расположены звезды, все тоже выглядит вечным и неизменным. Ньютону это казалось сомнительным. В зрелые годы он не смог удовлетвориться умалчиванием. Он неоднократно писал о том, что, будучи уверен в справедливости закона тяготения, как и остальных законов механики, он не знает, чем вызвана сила тяготения и как начались небесные движения. Уравнения говорили о том, что никакого начала никогда не было. Но возможно и другое: некогда, в некий начальный момент, мир вдруг возник таким, каким мы знаем его теперь. Начиная с этого момента он развивался так же, как теперь. И будет таким вечно. В конце жизни разум Ньютона изнемог в поисках истины. Он сослался на бога, отнеся на его счет начальные условия, начальный толчок, сотворение мира.

Борьба с вечностью

Представление Ньютона о вечности Вселенной вместе с разработанным им методом исследования стало основой того, что мы называем классической физикой. Тревожившие его мысли о начальных условиях, о конечности и бесконечности Вселенной отошли на второй план и со временем были забыты.

Стремление человечества к познанию мира, результаты многочисленных опытов снова поставили на повестку дня вопрос о начальных условиях. Главную роль при этом сыграло осознание закона сохранения энергии. Астрономам стало ясно, что Солнце, выделяя огромную энергию, не может светить вечно. Не могут вечно вращаться вокруг осей планеты и спутники. Ведь приливное трение превращает в тепло запасы энергии собственного вращения планет. Это определяет будущую эволюцию Солнечной системы. Вращение планет и спутников вокруг их осей постепенно замедлится, период этого вращения будет увеличиваться до тех пор, пока он сравняется с периодом орбитального движения. Так уже случилось с планетой Меркурий и с Луной. Они всегда обращены к центральному телу одной стороной: Меркурий к Солнцу, Луна к Земле.

Как ни малы атомы, молекулы и пылинки, разбросанные в космическом пространстве, они тормозят орбитальное движение планет и их спутников. Поэтому их орбиты постепенно сжимаются так, что они вращаются не по эллипсам, а по спиралям, очень медленно, но неизбежно приближающимся к центру.

Планеты должны в будущем упасть на Солнце, а спутники на свою планету. Но перед этим силы притяжения центрального тела разрушат их, образовав подобие колец Сатурна, которые возникли при разрушении одного или нескольких из его спутников, двигавшихся слишком близко к планете. В последнее время улучшение методов наблюдения, включая наблюдение при помощи космических обсерваторий, позволило обнаружить кольца, подобные кольцам Сатурна, и вокруг других планет.

Так развитие физики и астрономии привело к неоспоримому выводу: Солнечная система не вечна, ее существование ограничено.

Это принципиальный результат. Он возник, когда вычислить время до разрушения планет и их спутников еще не умели (сейчас известно, что это время измеряется миллиардами лет), но ученые уже не могли избавиться от мысли о том, что если Солнечной системе уготован конец, то у нее должно быть и начало.

Вопрос о происхождении Солнечной системы тревожил не только астрономов и физиков, но и философов. Первым взял слово один из крупнейших философов И. Кант. Кант был философом-идеалистом создателем особого философского направления, которое сохранило его имя: кантианство, философия Канта.

Кант был глубоко образованным человеком, обладавшим обширным кругозором и знаниями в области конкретных наук.

Обдумывая вопрос о судьбе Солнечной системы, Кант не пытался найти ответ только в сфере философии. Он не уподобился и натурфилософам, пытавшимся решать все вопросы путем словопрений, путем логического вывод; следствий из причин, казавшихся им подходящими для; решения конкретной задачи.

Кант изучал труды выдающихся астрономов, знал, что те обнаружили в мировом пространстве не только звезды, но и туманности. Среди многочисленных туманностей час попадались туманности, обладавшие вполне определенной — спиральной структурой. Обычно спиральная туманность имеет ядро, из которого в противоположных направлениях выходят два изогнутых рукава. Во многих случаях удавалось рассмотреть в этих рукавах отдельные звезды.

Этого было достаточно для аналитического ума Канта. Он предположил, что Солнечная система образовалась из подобной туманности. Яркое ядро превратилось в Солнце, из рукавов туманности выделились планеты и их спутники. Вскоре математик П. С. Лаплас сумел математически обосновать процесс эволюции спиральной туманности, превращающий туманность в систему, состоящую из центральной звезды и спутников.

Теория Канта — Лапласа стала общепризнанной, вошла школьные учебники. Слабое место в ней нашел астроном Д. Джине. Джине хорошо владел математикой и физикой. Он один из первых представителей комплексной науки астрофизики, изучающей астрономические явления с точки зрения физики. Джине отверг теорию Канта — Лапласа потому, что она противоречит одному из законов механики. Речь идет о законе сохранения вращательного движения. В изолированной системе в течение всей ее эволюции должна оставаться постоянной величина, служащая количественной характеристикой вращательного движения. Ее называют моментом количества движения. А эволюционирующая спиральная туманность, удаленная от других небесных тел, является практически изолированной. Значит, эта величина должна в ней быть всегда неизменной. Джине продумал модель Канта — Лапласа с этой точки зрения. Вот его вывод: оценки показывают, что начальное значение этой величины для туманности, якобы породившей Солнечную систему, вопреки закону сохранения, не соответствует распределению этой величины между Солнцем и планетами. Простая и изящная теория Канта — Лапласа не выдержала сравнения с опытом и должна быть отброшена.

Наука не может удовлетвориться отбрасыванием ошибочной теории. Она требует найти замену.

Случайная встреча

Замену нашел сам Джине. Он рассуждал так: в космическом пространстве могут случайно сблизиться две звезды. Сблизиться не настолько, чтобы столкнуться между собой под действием взаимного притяжения, но пройти так близко, что силы взаимного притяжения становятся большими. При этом прямолинейные траектории звезд искривляются, превращаются в гиперболы, обращенные одна к другой своими вершинами.

Миновав вершины гипербол — точки их наибольшего сближения, — звезды опять разойдутся. Их траектории постепенно распрямятся, и звезды снова будут двигаться в мировом пространстве по прямым траекториям. Выйдут ли звезды после наибольшего сближения на гиперболы, уводящие их одну от другой, или столкнутся — зависит от начальных условий. От масс звезд и от первоначальных направлений и скоростей их движения. Образование звездных пар — двойных звезд при их сближении маловероятно. Это очень редкий пограничный случай, подобный курьезу, когда упавшая монета останется стоять на своем ребре.

Даже в том случае, когда две звезды, сблизившись на достаточно малое расстояние, разминутся, встреча не пройдет для них бесследно. Огромные силы взаимного притяжения вызовут в обеих звездах появление приливных волн. Приливные волны, как и волны океанских приливов на Земле, всегда возникают парами. На Земле они располагаются в противоположных концах диаметра, направленного вдоль линии, соединяющей центры Земли и Луны.

На сближающихся звездах высота приливных волн постепенно возрастает, и эти волны, как бы следя за партнером, приобретают форму спирали. Если звезды прошли достаточно близко, то уже на этой стадии возможен разрыв приливных волн с образованием огромных капель раскаленной материи. Такой разрыв может произойти и позже, так как огромная приливная волна не может втянуться в тело звезды как единое целое. Судьба отдельных частей приливной волны зависит от того, как высоко эти части поднялись над поверхностью звезды и какую скорость они приобрели при этом. Нижняя часть приливной волны вновь упадет на звезду. Средняя часть, распавшись на огромные сгустки, станет родоначальником планет, вращающихся вокруг своей оси и вокруг звезды по орбитам, мало отличающимся от круговых. Верхняя часть может породить кометы, движущиеся вокруг материнской звезды по вытянутым эллипсам, а самая верхняя часть приливной волны способна безвозвратно уйти в космическое пространство.

Теория Джинса объясняла и происхождение спутников. На каплях раскаленного вещества — протопланетах — тоже возникнут огромные приливные волны. Они в свою очередь разобьются на сгустки. Часть сгустков превратится в спутники центрального сгустка — будущей планеты. Часть упадет обратно на будущую планету. Третья часть упадет на центральную звезду.

Теория Джинса непринужденно объясняла, почему спутники и планеты Солнечной системы вращаются в одну и ту же сторону, из-за чего спутники планет и малые планеты стали твердыми, в то время как большие планеты остались жидкими: малые тела остывают быстрее крупных. Она объясняла даже возникновение пояса астероидов, находящегося между Марсом и Юпитером. Там, поясняет теория, находилась еще одна протопланета, но она двигалась слишком близко к Юпитеру, и его мощное притяжение разрушило эту протопланету.

Теория Джинса свободна от проблемы сохранения момента количества движения, ибо она исходит из того, что избыточный момент количества движения планет возник в процессе образования приливных волн и его величина может оказаться в полном соответствии с данными астрономов.

Теория Джинса была не менее ясна и наглядна, чем ее предшественница, и привлекла многих сторонников. Она тоже вошла в школьные учебники, несмотря на обнаруженное впоследствии обратное направление вращения некоторых спутников больших планет. Такие спутники могли быть захвачены планетой впоследствии, говорили сторонники гипотезы Джинса.

Но и эта теория пала жертвой математических расчетов. Ее погубила статистика.

Простые статистические оценки показали: звезды в нашей Галактике, в частности там, где расположена Солнечная система, отстоят так далеко одна от другой и имеют столь малые (в космических масштабах) скорости относительного движения, что сближения двух звезд на такие расстояния, при которых выполняются условия, предусмотренные теорией Джинса,

происходят с ничтожно малой вероятностью. Требуемые скорости и расстояния сближения зажаты в очень узкие границы. Чуть ближе — они столкнутся. Чуть дальше — приливные волны окажутся недостаточно велики для того, чтобы их части приобрели «первые космические скорости» относительно материнской звезды. Но тогда сгустки материи, порожденные из приливных волн, не выйдут на орбиты спутников материнской звезды, на планетные орбиты и упадут на нее.

После того как стали ясны недостатки теории Джинса, появилась новая теория происхождения планет. Ее предложил О. Ю. Шмидт, советский ученый, больше известный как полярник и руководитель героической эпопеи челюскинцев. Он предположил, что Солнце и планеты возникают из постепенно концентрирующихся пылинок, первоначально образующих допланетное облако. Он считал, что разогрев внутренних областей планет и разогрев Солнца возникают позже вследствие распада радиоактивных элементов.

Но расчеты показали, что энергии радиоактивного распада недостаточно для поддержания излучения Солнца в течение 4,5 миллиарда лет. Это возраст старейших горных пород на Земле, оцененный на основе изучения содержания различных радиоактивных элементов и свинца в этих породах. Впоследствии теория Шмидта была переработана, чтобы увязать ее с современной теорией эволюции звезд, вращающейся на термоядерных реакциях в их недрах.

Загадка возникновения и эволюции звезд была осознана учеными, когда стало ясно, что звезды не вечны, что черпание внутренней энергии звезд ведет к их гибели. Астрономы-наблюдатели в течение длительного времени накапливали сведения о количестве видимых звезд, которое быстро возрастало с увеличением размеров телескопов, позволявших ученым наблюдать все более удаленные области космического пространства.

Оказалось, что звезды, недоступные невооруженному глазу, как и видимые звезды, можно классифицировать по их цвету: они бывают от голубовато-белого до темно-красного цвета. Было естественным предположить, что различие цвета связано с различием температуры на поверхности звезд.

Решающее влияние на развитие астрономии сыграло изобретение спектрального анализа, позволившего судить о химическом составе звезд на основе исследования их света.

У. Волластон в 1802 году обнаружил в спектре Солнца семь тонких темных линий. Он решил, что они разделяют между собой цвета солнечного спектра, и не придавал им никакого значения. И. Фраунгофер, экспериментируя в 1814–1815 годах с изготавливаемыми им стеклянными призмами и пропуская через них свет Солнца, заметил множество тонких темных линий, рассекавших получающийся при этом спектр. Он обратил внимание на то, что расстояние между отдельными линиями изменялось в зависимости от состава стекла, примененного для изготовления призмы.

Фраунгофер внес чрезвычайно большой вклад в создание оптических приборов, начиная от разработки методов изготовления оптического стекла и способов полировки призм и линз до создания совершенных объективов. Он нашел применение открытым им темным линиям спектра Солнца для оценки преломляющих свойств стекла.

Но Фраунгофер не стал изобретателем спектрального анализа. Областью его интересов были оптические приборы, а открытые им темные линии он применял лишь для измерения характеристик различных стекол.

Первым, кто связал спектральные линии с определенными химическими элементами, был Ф. Тальбот. А связь между темными линиями и яркими линиями, возникавшими в опытах с лабораторными источниками света, установил в 1849 году Л. Фуко. Он наблюдал яркие спектральные линии, появлявшиеся иногда в пламени вольтовой дуги. Особенно яркой была желтая спектральная линия, возникавшая, когда в пламя вольтовой дуги попадали вещества, содержащие натрий. Но когда он направлял через пламя дуги солнечный свет, на том же месте экрана возникала темная линия. Фуко понял, что пары натрия, испускающие желтую спектральную линию, поглощают часть солнечного спектра, соответствующую этой спектральной линии. Она кажется темной потому, что яркость соседних участков солнечного

спектра много больше, чем яркость спектральной линии, излучаемой атомами натрия при температуре вольтовой дуги. Однако и это открытие не привлекло должного внимания.

Лишь через десять лет Г. Кирхгоф и Р. Бунзен опубликовали работу, положившую начало новой области науки — спектральному анализу. После работ Кирхгофа и Бунзена стало совершенно ясно, что фраунгоферовы линии возникают в том случае, когда свет, излучаемый раскаленным телом, проходит через пары, находящиеся при более низкой температуре. Причем положение спектральных линий является «визитной карточкой» каждого химического элемента.

Так родилась астрофизика. Читатель вправе возразить: возможность изучать химический состав небесных тел должна породить астрохимию, а не астрофизику. В этом доля правды, но астрохимия, возникнув на основе спектрального анализа, остановилась бы в своем развитии на самом начальном этапе — на стадии классификации. Ее венцом было бы введение в звездные каталоги дополнительного столбца, содержащего сведения о химическом составе атмосферы каждой из звезд.

Но перед физиками, интересующимися проблемами мироздания, и перед астрономами, желающими понять строение и эволюцию небесных тел, спектральный анализ открыл широчайшие перспективы. Сравнение положения фраунгоферовых линий, наблюдаемых в спектрах звезд и туманностей, с такими же линиями, наблюдаемыми в лаборатории, показало, что они во многих случаях сдвинуты к красному или фиолетовому концу спектра. Так в арсенал астрофизиков вошел закон Доплера, обнаружившего влияние движения источника звука на высоту акустических тонов, а значит, и на длину звуковых волн. Так доплеровское смещение оптических спектральных линий стало основой надежного измерения скоростей движения звезд. Позже астрофизики начали применять измерение сдвига спектральных линий, испускаемых газовыми туманностями, для определения скоростей их движения. Изучая строение спектров небесных объектов, физик может получить сведения о температуре излучающих и поглощающих слоев газовых туманностей и атмосфер звезд, о наличии и величине магнитного поля. А для Солнца и протяженных туманностей может также получить сведения о распределении магнитных полей в пространстве (так были обнаружены и изучены магнитные поля солнечных пятен), о движениях в атмосферах звезд и в газовых туманностях и т. п.

Астрофизики получили данные, по которым астрономы вычислители определили взаимные движения двойных звезд, скорости и направления движения многих небесных объектов и многое другое, о чем будет рассказано ниже.

Так было установлено, что основная часть света Солнца и звезд исходит из глубин их атмосфер, где давления велики. С увеличением давления растет и ширина всех спектральных линий. При очень высоких давлениях спектральные линии сливаются между собой, спектр становится сплошным, подобным спектру раскаленного твердого вещества. Наблюдая сплошной спектр, невозможно судить о составе светящегося вещества. Но в более высоких и более холодных частях атмосферы Солнца и звезд, где давление мало, происходит образование фраунгоферовых линий. Оно возникает вследствие поглощения части света, идущего из глубины, теми атомами, которые находятся в верхних слоях атмосферы Солнца и звезд, где температуры ниже, чем в глубинных областях.

Астрономы, овладевшие методами спектрального анализа, вскоре обнаружили в спектрах некоторых туманностей яркие спектральные линии. Это означало, что туманности образованы разреженными светящимися газами. Но существуют и другие туманности, в спектрах которых нет ярких линий, а наблюдаются только фраунгоферовы линии. Они являются не истинными туманностями, а удаленными звездными скоплениями, в которых и крупнейшие телескопы не способны выделить отдельные звезды. Фраунгоферовы линии возникают здесь при прохождении света звезд через их атмосферы и разреженные газовые облака, подобные тем, что обнаружены в межзвездном пространстве нашей Галактики.

Спектральный анализ позволил астрономам судить о температуре и составе звезд. На этой основе астрофизики построили теорию эволюции звезд. Согласно этой теории, звезды

образуются в огромных туманностях, вещество которых постепенно собирается в крупные сгустки-сгустки-протозвезды. Первоначально туманность состоит из холодных и холодных частиц космической пыли, образовавшихся в ходе случайных столкновений атомов.

По мере сжатия протозвезд энергия силы тяготения — гравитационная энергия — превращается в тепловую энергию, и протозвезда становится видимой. Она выглядит слабо светящееся красным светом протяженное тело. В этой стадии ее уже считают звездой и относят к классу красных гигантов. Наблюдения, проведенные в последнее время в невидимых инфракрасных лучах, позволили обнаружить инфракрасные звезды — протозвезды, более холодные, чем красные гиганты.

Спектры красных гигантов содержат фраунгоферовы линии, свидетельствующие о том, что светящаяся звезда окружена холодной газовой оболочкой.

Ниже мы более подробно проследим дальнейшую эволюцию звезд. Теперь же отметим, что только привлечение спектрального анализа позволило изучать процессы, происходящие в глубинах космоса, узнать, на какой стадии развития звезд возникает возможность образования планетных систем. Спектральный анализ заставил астрофизиков отбросить первоначальный вариант теории происхождения звезд, исходивший из того, что весь запас энергии протозвездной туманности заключается в ее гравитационной энергии. Потребовал пересмотра и второй вариант, к которому была дополнительно привлечена энергия, освобождающаяся за счет радиоактивного распада. И этой энергии оказалось недостаточно для того, чтобы обеспечить свечение звезд в течение миллиардов лет.

Звезды и атомы

Современные представления об эволюции звезд смог возникнуть только после создания квантовой физики. Ученые задолго до овладения ядерной энергией теоретически изучили ядерные реакции, в ходе которых протон и нейтроны объединяются в ядра гелия и других легких элементов. Такие реакции приводят к выделению столь большого количества энергии, что оно вполне покрывает энергетические потери звезд во время главных этапов их эволюции. Цикл ядерных реакций, способный удовлетворить всем данным наблюдательной астрономии, пережил целый ряд увлекательных метаморфоз.

Может показаться удивительным, что вывод о том, что энергия, уносимая излучением Солнца и звезд, выделяется в ходе ядерных реакций синтеза, был получен до того, как ученые поняли, каким образом можно искусственно создать условия, необходимые для протекания таких реакций.

Причиной такой непоследовательности оказалось бурное развитие ядерной физики, обеспеченное как исследованиями космических лучей, так и созданием ускорителей заряженных частиц. Обилие экспериментальных результатов, полученных из этих двух источников, вызвало поток теоретических исследований, в свою очередь стимулировавших экспериментаторов. Именно такая непосредственная связь теории и эксперимента обеспечила прорыв в микромир, а это в свою очередь открыло новые перспективы в астрофизике.

Однако все эти успехи не продвинули ученых к пониманию таинственных процессов рождения звезд и планет. Возможность продвижения в эту область обеспечили не столько результаты астрономических наблюдений, сколько прогресс в развитии электронных вычислительных машин. Только ЭВМ помогли разобраться в том, как туманности превращаются в звезды, в недрах которых начинаются ядерные реакции. При помощи ЭВМ удалось понять, как исчезают парадоксы, заставившие ученых отказаться от Ю — Лапласа.

Основной экспериментальный материал, заложенный в математические модели, которые переработали ЭВМ, собран радиоастрономами. Радиоволны и отчасти инфракрасные волны позволили получить сведения о внутреннем состоянии и процессах в туманностях, в которые невозможно проникнуть при помощи оптических телескопов. При этом радиоволны приносят сведения о начальных этапах, когда туманность очень разрежена

и почти однородна. Инфракрасные лучи позволяют обнаружить начальные этапы возникновения звезд в глубинах этих туманностей. Плотность вещества в туманности и в молодой протозвезде различается в 10^{20} раз (в сто миллиардов миллиардов раз). Все, что мы знаем о процессах, протекающих при рождении протозвезд из туманностей, сообщили нам ЭВМ, «перемоловшие» огромную информацию. Впервые этот путь исследования выбрал Р. Ларсен из Йельского университета.

Процесс начинается так, как описывал Ньютон в письме к Р. Бентли: ограниченная масса вещества стягивается силами тяготения в плотный сгусток. Теперь мы называем такой процесс гравитационным коллапсом и знаем, как развивается этот процесс. На первом этапе под влиянием тяготения облако сжимается и постепенно становится более плотным, а его температура повышается за счет энергии гравитации.

Инфракрасное излучение еще выходит из глубин облака, унося энергию и приводя к тому, что температура повышается только до 10 К^* , когда выделение гравитационной энергии уравнивается ее потерями в результате излучения.

Давление излучения, предсказанное Максвеллом открытое П. Н. Лебедевым, еще мало и не препятствует гравитационному коллапсу. По мере развития этого процесса плотность вещества увеличивается без увеличения его температуры до тех пор, пока излучение уносит наружу всю энергию, выделяющуюся в ходе коллапса. Но когда плотность облака возрастает настолько, что оно становится непрозрачным для инфракрасных лучей, энергии прекращается, давление и температура облака возрастают, и коллапс прерывается совместным действием давления излучения и вещества. В это плотность внутренней части облака достигает 10^{14} частиц на кубический сантиметр, а температура в нем поднимается до 100 К . Радиус этой плотной области, образующей будущее ядро, примерно в 5 раз превышает расстояние от Земли до Солнца.

Начинается сравнительно спокойный этап, при котором внутреннее давление в ядре удерживает его от дальнейшего сжатия.

Вещество внешних частей облака продолжает падать на ядро, а оно постепенно становится более плотным горячим. Нагреванию способствует и то, что в плотной части облака атомы водорода пролетают так близко один от другого, что они с большой вероятностью соединяются в молекулы, а этот процесс сопровождается выделением энергии.

Но даже после образования молекулярного водорода нагревание ядра продолжается главным образом за гравитационной энергии внешних частей облака, падающих на его центральную часть. Так продолжается до тех пор, пока температура в центральной части не достигнет 2000 К , а его плотность увеличится еще в 100 раз. При этой температуре молекулярный водород, содержащийся здесь, диссоциирует — молекулы распадаются на атомы. Этот процесс поглощением энергии, а значит, температура вновь уменьшается. При этом давление излучения и вещества уже не может уравнивать силу тяготения. Начинается вторая стадия гравитационного коллапса. Вещество внутренних слоев быстро падает к центру до тех пор, когда концентрация достигнет 10^{24} частиц на 1 см^3 , а температура — $100\,000\text{ К}$. При этом давление в центральной части уравнивает силу тяготения. Второй этап коллапса прекращается. Вблизи центра облака образуется более плотное ядро. Оно сравнительно мало, лишь в несколько раз больше современного Солнца, и содержит только малую часть массы облака. Процесс при этом становится спокойным. Вещество из внешних частей облака постепенно выпадает на новое ядро. Его масса и температура медленно увеличиваются. Так рождается звезда, последующее сжатие которой под давлением силы тяжести поднимает температуру в ее центральной части до нескольких миллионов градусов. При этом в центре звезды начинаются термоядерные реакции и ее дальнейшая эволюция идет по хорошо изученному пути эволюции большинства звезд. Это, конечно, очень упрощенная картина.

В действительности процесс усложняется тем, что первоначальная туманность в большинстве случаев вращается в пространстве. При этом в коллапсе участвуют лишь внутренние области туманности. Внешние области удерживаются центробежной силой и не

падают к центру. Процесс приобретает сходство с моделью Канта — Лапласа: облако становится похожим на двояковыпуклую линзу или диск. Но в наше время знание законов термодинамики и газодинамики вместе с вычислительными возможностями ЭВМ позволяют разобраться в процессе более подробно, чем это было доступно Лапласу и последующим ученым вплоть до первой половины семидесятых годов нашего века.

ЭВМ показали, что в ходе коллапса вещество вращающегося облака расслаивается. В коллапсе участвует малая центральная часть облака, остальная часть вещества отрывается от внутренней части, сжимаясь в огромные бублики, вращающиеся внутри дискообразного облака еще Максвелл, изучая строение колец Сатурна, установило, что такие бублики неустойчивы. ЭВМ подтвердили вы Максвелла и показали, что вещество бубликов распадается на огромные куски, каждый из которых коллапсирует к своему центру. Так из большинства туманностей возникает звездная система, содержащая иногда сотни звезд. При этом эволюция может складываться и из более чем двух бурных стадий гравитационного коллапса, разделенных спокойными стадиями.

ЭВМ позволили проследить и дальнейшие стадии эволюции. Оказалось, что Солнечная система может родиться по крайней мере двумя путями: путем дальнейшей эволюции одного из фрагментов, возникших в результате последовательных коллапсов вращающегося облака или в ходе эволюции менее крупного, медленно вращающегося облака.

И в том и другом случае вещество облака приобретает форму вытянутого веретена или, скорее, форму огурца концы которого слегка согнуты в форме зародыша спирали, фигурирующей в теории Канта — Лапласа. Но, в отличие от этой теории, теперь установлено, что избыток вращательного движения центральной части облака передается в его внешние части. Поэтому вращение внутренней части замедляется, а скорость движения внешних облаков! постепенно увеличивается, так что итогом этого процесса может оказаться медленно вращающаяся центральная звезда, окруженная планетами. Недавнее открытие уплощенной газопылевой оболочки вокруг звезды, которую астрономы обозначают — «бета» созвездия Живописца, может рассматриваться как реализация одной из стадий описанного процесса: центральная часть газопылевого облака уже сколлапсирована в плотное тело, внутренняя температура которого достаточна для начала термоядерной реакции, а в неустойчивом газово-пылевом диске начинается образование планет.

Так современная наука, объединив при помощи ЭВМ наблюдения астрономов с механикой, термодинамикой и ядерной физикой, пришла на новом уровне к пониманию процесса образования звезд и планетных систем. В новом сценарии рождения звездных систем можно усмотреть сходство с теорией Канта — Лапласа в начальной стадии процесса и с теорией Шмидта на заключительном этапе.

Обсуждая проблему образования Солнечной системы, мы следовали логике науки, но нарушили хронологию. Теперь нам придется возвратиться к началу века.

Эволюционная астрофизика изучает не только длительные плавные изменения космических объектов, но и катастрофические процессы, возникающие на определенных стадиях эволюции и приводящие к возникновению ярких и очень ярких новых и сверхновых звезд. Она включает в свои задачи и ключевой вопрос о том, как и из чего возникли звездные скопления — галактики, как и из чего возникла вся Вселенная.

Уже на рубеже нашего века ученые не сомневались в том, что и Вселенной в целом свойственно развитие. Но серьезные ученые не брались за изучение эволюции Вселенной. Они не имели ни нужного для этого наблюдательного материала, ни соответствующей теории, основанной на известных, твердо установленных законах природы.

Новый фундамент

Ситуация изменилась, когда Эйнштейн создал теорию относительности. Он разрабатывал ее не с целью изучения эволюции Вселенной. Эйнштейн поставил перед собой другую цель: разработать теорию, способную устранить противоречие между механикой и

электродинамикой, между законами движения вещества и свойствами света.

В 1905 году Эйнштейн показал, что достаточно изменить процедуру измерения времени и расстояний, чтобы устранить эти противоречия. При этом Эйнштейн выяснил, что предложенный им метод измерения времени и длины вместе с предположением о постоянстве скорости света позволяет расширить область применимости принципа относительности за пределы механических движений, изученных Галилеем. Он установил, что принципу относительности подчиняются и оптические процессы. Такое расширение приводит к замене простого уравнения, выражающего принцип относительности Галилея, другими уравнениями, совпадающими с преобразованиями, полученными Лоренцом и теперь носящими его имя.

Так Эйнштейн устранил противоречия между механикой, описывающей движение всех тел, и электродинамикой, управляющей движением света и силами, действующими между электрическими зарядами и магнитами. Он достиг этого путем сравнительно небольшого усложнения уравнений движения.

Теория удовлетворяла всем требованиям, предъявляемым к научной теории: она была непротиворечива и однозначна, описывала все известные явления и предсказывала неизвестные, которые затем подтверждались опытом.

Теория была вскоре признана большинством ученых. Им пришлось примириться с непривычными уравнениями и со странной зависимостью размеров тел, их масс и интервалов времени от скорости относительного движения этих тел. Следовало научиться пользоваться новыми уравнениями, позволяющими глубже проникнуть в тайны природы. Неожиданный вывод Эйнштейна о том, что между массой вещества и энергией, заключенной в нем, существует жесткая связь, казался в то время несколько странным, но не связанным с тем, что можно наблюдать в природе и в специальных опытах.

Все были довольны тем, что наконец устранены противоречия между электродинамикой и механикой, что исчезли парадоксы, возникавшие раньше при попытках применить электродинамику к движущимся телам. Довольны были все, за исключением Эйнштейна. Его с самого начала тревожила необходимость ограничивать новую теорию случаем равномерных и прямолинейных движений. Ускоренные и вращательные движения оставались за ее пределами. Доведя построение теории до конца и получив из нее ряд интересных результатов, он продолжал обдумывать суть ограничений, заложенных в теории, причины их возникновения, возможные пути устранения.

Два года прошло в мучительных раздумьях и безуспешных попытках. Не найдя выхода, Эйнштейн высказал свою тревогу в докладе перед собранием ученых, а затем и в статье, направленной в ведущий физический журнал.

Эйнштейн обращал внимание физиков на ограниченность теории. Ее нельзя применять, если в изучаемых процессах участвуют вращающиеся тела или если они подвержены простому прямолинейному ускорению, например, при движении в поле тяжести.

Потребовались годы упорной работы, в ходе которой Эйнштейн продумывал и проверял различные способы расширения теории, основанные на известных свойствах природы. Он комбинировал различные варианты уравнений, воплощающих эти свойства.

Ключом, открывшим Эйнштейну путь к решению задачи, стал известный эксперимент венгерского физика Р. Этвеша, выявивший с чрезвычайной точностью пропорциональность между массой, связанной с ускорением тел (ее называют инертной массой), и их тяжелой (гравитационной) массой, определяющей вес тел в поле тяготения.

Именно из-за этой связи все тела падают с одинаковым ускорением (факт, установленный Галилеем). Это со своей стороны, приводит к тому, что масса, входящая во второй закон Ньютона (закон ускорения), и масса, входящая в закон тяготения, являются двумя проявлениями единой сущности.

Ни механика Ньютона, ни первоначальный вариант теории относительности не объясняли этого равенства. Пропорциональность инертной и гравитационной массы всех тел присутствовала в обеих теориях. Обе теории учитывали этот факт, а поэтому не

противоречили ему. Ученые признали, что пропорциональность инертной и гравитационной массы является одним из глубинных свойств природы, и смирились с тем, что причины этой пропорциональности оставались неизвестными.

Но Эйнштейн не мог примириться с таким положением. Он чувствовал, что здесь проявляется не известная ему фундаментальная закономерность, и настойчиво пытался ее понять.

Глубокий физический анализ, опирающийся на интуицию и на твердую уверенность в том, что все тайны природы могут быть познаны, привел Эйнштейна к цели. Он понял, что в опытах, производимых в лабораториях, имеющих малые размеры по сравнению с радиусом Земли, а таковы практически все лаборатории, совершенно невозможно установить различие между действием ускорения и действием тяготения. Он увидел в этом возможность развития первоначального варианта теории относительности. Новый вариант объяснял, почему в изолированной лаборатории не только при помощи механических опытов, но и на основе оптических экспериментов невозможно определить, покоится ли лаборатория или она перемещается с постоянной скоростью, постоянной и по величине и по направлению.

Теперь Эйнштейн осознал истинный смысл опыта Этвеша. Опыт Этвеша указывал на то, что и о равномерно ускоренном движении лаборатории нельзя судить по опытам, производимым внутри этой лаборатории без привлечения к опыту тел, находящихся вне ее. Эйнштейн иллюстрировал это знаменитым мысленным экспериментом в лифте. Приборы, расположенные в лифте, не могут различить, покоится ли лифт в поле тяжести, например в гравитационном поле Земли, или лифт находится в космическом пространстве вдали от крупных небесных тел, где поле тяготения исчезающе мало, а какая-то постоянная сила, приложенная извне, движет лифт с постоянным по величине и направлению ускорением.

Но теперь Эйнштейн не мог ограничить теорию случаем постоянного ускорения. Он понимал недостаточность этой полумеры. Нужно было создать теорию, применимую в случае любых ускоренных движений и любых полей тяготения. Ведь эквивалентность ускорения и поля тяготения существует только в небольших областях пространства, в небольших лабораториях. Невозможно, придавая общее ускорение, заменить поле тяготения Земли в двух лабораториях, находящихся в противоположащих точках земной поверхности. Для того чтобы достичь цели, пришлось бы ускорять эти лаборатории в противоположных направлениях, тянуть каждую в зенит, но в антиподах эти направления противоположны.

Решающий шаг

Ценой огромных усилий, изучив и применив не известное ему ранее тензорное исчисление (разработанное специально для решения сложных задач механики твердых тел), Эйнштейн пришел к системе уравнений, объединяющей все механические и электромагнитные процессы.

Новые уравнения показали существование удивительных связей: свойства пространства зависят от распределения в нем вещества. В свою очередь движения материальных тел зависят от свойств этого же пространства.

Теперь стало понятно: движение любого тела во Вселенной, если на него действуют только силы тяжести, определяется лишь расположением рассматриваемого тела относительно всех остальных тел, разбросанных в пространстве. Конечно, основное воздействие оказывают близкие тела. Новые уравнения описывают любые движения, и поэтому они сложнее прежних.

Несмотря на сложность уравнений, Эйнштейну удалось решить их. Он обнаружил, что они объясняют одно непонятное явление и предсказывают два неизвестных явления.

Простейшей задачей вычислительной астрономии является исследование движения планеты вокруг Солнца. Конечно, она становится простой, только если пренебречь влиянием остальных планет на движение рассматриваемой планеты. Эту задачу впервые решил Ньютон.

Оказалось, что установленные им законы механики, включая закон всемирного тяготения, приводит к движениям по орбитам, форму которых установил Кеплер. Планеты движутся по эллипсам. В одном из фокусов этих эллипсов находится Солнце. Ньютон получил этот результат не из наблюдений, как Кеплер, а из закона тяготения и уравнений механики.

Естественно, что Эйнштейн начал проверку своих новых уравнений с решения той же задачи. Он не сомневался в том, что придет к результату, полученному Ньютоном. Это подтвердило бы правильность новых уравнений. Будь результат другим, он противоречил бы наблюдениям астрономов.

Результат оказался неожиданным. Конечно, он был близок результату Ньютона. В первом приближении, на первом этапе приближенного решения новых уравнений получалось, что планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых расположено Солнце. Однако было и различие. На втором этапе, при уточнении полученного решения, оказалось, что эти эллипсы не неподвижны. Они сами очень медленно вращаются вокруг Солнца.

Все знали, что это не так. Знал это и Эйнштейн. Но он верил в правильность новых уравнений и в то, что при их решении не допущена ошибка. Он не пал духом. Может быть, астрономы просто не заметили этого медленного вращения?

Эйнштейн начал тщательно изучать статьи астрономов, исследовавших движение планет. И был вознагражден. Несколько астрономов сообщали о странном и необъяснимом движении орбиты планеты Меркурий. Это вращение не могло быть следствием влияния других известных планет. Такие гипотезы не подтверждались расчетами. Оставалась единственная гипотеза: может быть, между Меркурием и Солнцем существует еще одна планета, орбита которой очень близка к Солнцу? Столь близка, что ее не удастся увидеть на фоне зари. Но астрономы с сомнением относились к этой гипотезе. Они просто приняли к сведению, что существует еще не объясненное медленное вращение орбиты планеты Меркурия, в результате которого Меркурий описывает в пространстве сложную кривую. Эйнштейн понял всю важность этого факта для его теории. Ведь уравнения новой теории относительности предсказывали медленное смещение орбиты Меркурия. Замечательно, что полученная величина скорости вращения орбиты точно совпала с величиной, известной из непонятных ранее астрономических наблюдений.

Итак, новая теория объяснила загадку Меркурия. Теперь о предсказаниях. Из теории следовало, что луч света проходящий вблизи края диска Солнца, должен изменить свое направление — искривиться, — причем величина этого искривления складывается из двух равных величин. Первая возникала из-за того, что, в соответствии с первоначальной теорией относительности, кванты света (фотоны) обладают определенной массой и поэтому притягиваются к Солнцу. Вторая величина, равная первой, обусловлена тем, что само пространство вблизи Солнца искривлено силой тяготения. Эти две причины приводят к тому, что лучи света, распространяющиеся вблизи Солнца, перестают быть прямыми и искривляются вместе с искривлением пространства.

Это предсказание было блестяще подтверждено специальной экспедицией астрономов, наблюдавшей под руководством А. Эддингтона солнечное затмение 1919 года.

Сообщение о том, что луч света — символ прямизны — искривился в соответствии с предсказанием теории, вышло за пределы ученых собраний и разнеслось по всему миру, порождая славу создателю удивительной теории, ранее известному только узкому кругу специалистов.

Новая теория получила название «Общая теория относительности», а первоначальную теорию начали называть «Специальная теория относительности», так как она относится только к специальному случаю равномерных и прямолинейных движений.

Создатель теории понимал то, что еще оставалось скрытым от многих. Общая теория относительности есть прежде всего теория тяготения. Она впервые объяснила тайну тяготения, мучившую Ньютона. Ньютон был вынужден считать, что сила тяготения

мгновенно и полностью схватывает все мировое пространство, что она распространяется бесконечной скоростью. Он не мог объяснить, как она действует, как возникает.

Бесконечную скорость распространения силы тяжести отвергала уже Специальная теория относительности. В ее основе лежало убеждение Эйнштейна в том, что нет и не может быть движений или передачи сигналов со скоростью, превышающей скорость света. Общая теория относительности объяснила, как и почему возникает сила тяготения. Это объяснение казалось парадоксальным даже крупным ученым. Теперь нам кажется естественной суть теории и ее вывод: сила тяготения есть не что иное, как проявление искривления пространства под действием массивных тел. Это искривление распространяется во все стороны не бесконечно быстро, а со скоростью света. Таково второе предсказание теории относительности — предсказание существования гравитационных волн. Эти волны действуют на материальные тела очень слабо, и поэтому, несмотря на все усилия, до сих пор их не удалось обнаружить в земных лабораториях.

Но Эйнштейн понимал, что, несмотря на малую величину энергии, уносимой гравитационными волнами, они приводят к важному ограничению созданной им Общей теории относительности. Здесь прослеживается аналогия с ситуацией, приведшей к возникновению квантовой механики.

Планетарная модель атома, предложенная Резерфордом после открытия им атомных ядер, противоречила электродинамике Максвелла. Электрон, вращающийся вокруг ядра, в соответствии с уравнениями Максвелла обречен излучать электромагнитные волны, затрачивая на это энергию своего движения. Если это так, электрон постепенно приблизится к ядру атома и в конце концов упадет на ядро. Это должно привести к разрушению всех атомов, что противоречит опыту.

Как известно, Бор устранил это противоречие, предположив, что теория Максвелла неприменима к атомам, что в микромире действуют иные законы, не приводящий к излучению электромагнитных волн электронами, вращающимися по устойчивым орбитам вокруг ядра. Впоследствии первоначальный вариант квантовой механики, созданной Бором, был существенно переработан, но стабильность атомных систем заложена и в уравнениях современной квантовой физики.

Эйнштейн понимал, что гравитационные волны, излучаемые вращающимся электроном, тоже приводят к нарушению стабильности атома. Поэтому, указывал он, Общая теория относительности тоже должна быть ограничена какими-то квантовыми процессами. Это труднейший этап развития физики. Эйнштейн не сумел преодолеть его. Только после его смерти ученые начали продвигаться к созданию квантовой теории гравитации, к объединению Общей теории относительности с квантовой теорией.

Недавно астрономы косвенно подтвердили существование гравитационных волн, наблюдая один из пульсаров — особый тип звезд. Такие звезды испускают короткие цуги электромагнитных волн, следующие один за другим с точностью, которой могут позавидовать кварцевые часы. К удивлению астрономов, период, с которым следовали цуги, излучаемые этим пульсаром, в отличие от других, постепенно уменьшался. Эти изменения нельзя объяснить иначе, чем признав, что пульсар движется в паре с другой невидимой звездой. Измерения позволили вычислить период вращения этой пары вокруг общего центра масс невидимой звезды и пульсара. Ученые не нашли другого объяснения сокращению периода вращения этой пары звезд, чем признание того, что запас энергии ее вращения постепенно уменьшается. Уменьшается по мере того, как часть этой энергии непрерывно уносится в мировое пространство гравитационными волнами.

ГЛАВА 6

МИР, В КОТОРОМ МЫ ЖИВЕМ

Отыщи всему начало, и ты многое поймешь.

От неизменности к эволюции

В связи с тем, что поля тяготения и гравитационные волны охватывают все мировое пространство, уравнения Общей теории относительности описывают пространственно-временные свойства всей Вселенной. Решение этих уравнений должно поэтому содержать сведения всей Вселенной. Мы уже несколько раз встречались со словом «Вселенная», не давая пояснения тому, что отражает это понятие. Прежде чем идти дальше, необходимо сделать несколько пояснений. Понятие «Вселенная», как и большинство понятий, отражает объективные свойства окружающего мира. Подобно большинству понятий, оно претерпевает уточнения, обусловленные развитием науки. Следует сразу обратить внимание на уникальность понятия «Вселенная». Оно отражает уникальность стоящей за ним реальности: Вселенная — это весь мир Она включает в себя всё. Все звезды и галактики, всю видимую и невидимую материю, все физические поля. Вселенная существует в единственном экземпляре, ибо она безгранична, она охватывает всё, и не существует ничего что не входило бы в нее. Она была всегда и пребудет вечно. Не существует второй вселенной, с которой можно сравнить то, что заключено в понятии «Вселенная».

Уникальность, единичность Вселенной чрезвычайно затрудняет ее изучение. Одним из основных вопросов, на который необходимо ответить, исследуя Вселенную, это вопрос о том, остается она неизменной или изменяется с течением времени. Мы видели, что Ньютон исходил из представления о неизменности Вселенной. Он считал, что Вселенная остается неизменной, несмотря на то что в ней постоянно происходят разнообразные процессы, наблюдаются различные изменения. Его убеждение основывалось на неизменности законов Природы. Это позволяло думать, что процессы, протекающие в отдельных областях, не затрагивают Вселенную в ее всеобщности. Ньютон передал свою уверенность потомкам, которые скоро забыли о том, что Ньютону это внушало беспокойство.

Теперь мы пришли к рубежу, за которым открылись новые перспективы. Забегая вперед, скажем, что совсем недавно было показано, что, возможно, потребуется радикальное изменение понятия «Вселенная». Возможно, Вселенная, которую можно изучать при помощи сколь угодно совершенных приборов, не охватывает собой весь материальный мир. Вполне возможно, что в ходе эволюции наша Вселенная родилась вместе с другими вселенными из некоторой единой правселенной. Нам предстоит вместе с учеными пройти длинный путь, в конце которого возникла необходимость такого шага. Важно, что и этот шаг не последний, ибо развитие науки не имеет предела.

Возвратимся к Эйнштейну, который, преодолевая огромные математические трудности, продолжал исследовать новые уравнения. Не имея возможности сразу получить результат, Эйнштейн решил упростить задачу и для начала ограничиться каким-либо частным случаем. Выбор основывался на двух соображениях. Первое — математическое: следовало выбрать случай, наиболее упрощающий математические выкладки. Второе — физическое, основанное на многовековом убеждении ученых. На вере в неизменность Вселенной.

Ученые твердо установили, что Солнечная система, звезды и звездные скопления, а также газовые туманности претерпевают медленное эволюционное развитие. Но вопрос о развитии Вселенной как целого оставался открытым. Вернее, среди подавляющего большинства ученых господствовало мнение о том, что во Вселенной происходит вечный кругооборот материи и энергии.

Эйнштейн, руководствуясь этой полученной еще от Ньютона уверенностью в вечности и неизменности Вселенной, искал решения своих уравнений, соответствующие этому

предположению.

Он, конечно, знал, что уравнения Ньютона не допускают решений, соответствующих вечной, но ограниченной в пространстве Вселенной. Он понимал, что разреженное вещество, занимающее конечный объем, должно собраться к центру. А в масштабах Вселенной и звезды ведут себя как частицы разреженного газа. Он помнил и о том, что законы Ньютона не допускают вечного существования безграничной Вселенной. Малейшая неоднородность приведет к тому, что гравитационные силы соберут вещество Вселенной в множество гигантских сгущений. Недаром Ньютон не пытался применить свои уравнения для описания свойств Вселенной.

Уравнения Общей теории относительности в том виде как их написал Эйнштейн, были подтверждены опытом значит, они правильны. Но и они не допускали решений, описывающих Вселенную, существующую вечно с присущим ей вечным кругооборотом материи.

Эйнштейн считал это недостатком теории и искал выхода. Он нашел его, поступив так, как в свое время Максвелл.

Уравнения, полученные Максвеллом путем обобщения законов электростатики и магнетизма, не обладали симметрией. Максвелл считал это недостатком. Для того чтобы сделать свои уравнения симметричными, ввел в них дополнительный член. Он не имел для этого иных оснований, кроме стремления к математической симметрии. Никакой опыт не намекал на необходимость и даже на допустимость этого члена. Максвелл назвал новый член «током смещения вакуума». С точки зрения его современников, это было столь же нелепо, как и само произвольное введение этого члена в уравнения. Словосочетание было невежественным: если вакуум, то какой же в нем ток? Если ток, то какой же это вакуум? Но Максвелл стоял на своем: новый член играет для вакуума ту же роль, какую ток смещения зарядов играет для диэлектрика. Он обнаружил, что пополненные новым членом симметричные уравнения дают решение, имевшее смысл электромагнитных волн, распространяющихся в вакууме без какой-либо непосредственной связи с электрическими зарядами и магнитными полями. Никто никогда не наблюдал таких волн. Это мешало ученым признать теорию Максвелла. Одним из немногих поверивших в нее был Генрих Герц, блестящий экспериментатор и глубокий теоретик. Он поставил опыт с целью проверки теории Максвелла и обнаружил существование электромагнитных волн! Он показал, как их возбуждать и как обнаруживать их присутствие.

Так восторжествовала интуиция Максвелла, его уверенность в важной роли симметрии в законах, существующих в Природе.

Эйнштейн тоже считал, что полученные им уравнения не полны, так как не отображают важного свойства Вселенной: неизменности ее глобальных свойств. И ввел в уравнения дополнительный член. Он назвал его космологическим членом, чтобы подчеркнуть его значение в описании строения Вселенной, чтобы преодолеть противоречие между уравнениями и своей уверенностью в вечности Вселенной.

Эйнштейн сконструировал космологический член так, чтобы он описывал действие неведомой силы отталкивания, способной на больших расстояниях скомпенсировать силу тяготения, стремящуюся, как это установил Ньютон, стянуть Вселенную в компактные сгустки. Силу, способную удерживать галактики на их местах, несмотря на действие силы тяготения. При этом космологический член был выбран так, чтобы описываемая им сила отталкивания оказывалась малой в масштабах Солнечной системы и даже в масштабах галактик.

Достигнув своей цели, Эйнштейн считал Общую теорию относительности завершенной: уравнения описывают движения двойных звезд, планет, спутников под действием гравитации в точном соответствии с опытом.

Теперь он поставил перед собой следующую грандиозную задачу: создать единую теорию поля. В Общей теории относительности, в ее уравнениях, материя играет основную роль. Она определяет свойства «пространства — времени», его метрику, форму лучей света.

Электромагнитное поле играет в этих уравнениях важную, но второстепенную роль. В Общей теории относительности электромагнитное поле существует в пространстве, не оказывая влияния на свойства этого пространства, свойства, всецело определяемые распределением в нем вещества.

В Специальной теории относительности Эйнштейна не удовлетворяло выделенное положение равномерных прямолинейных движений. Ценой невероятных усилий он создал Общую теорию относительности, описывающую любые движения. Но теперь его мучило выделенное положение гравитационного поля. Он глубоко уверен в том, что поле тяготения и электромагнитное поле войдут в будущую теорию как равноправные сущности. Он стремился создать такую теорию и отдавал этой задаче все силы, все время.

В это время в Ленинграде жил скромный молодой физик и математик Александр Александрович Фридман. О нем мало что было известно до того момента, когда он опубликовал работу «О кривизне пространства». В ней он утверждал: из Общей теории относительности следует, что Вселенная расширяется, что звездные миры, галактики, межзвездное вещество разбегаются постоянно и неотвратно. Многие вместе с Эйнштейном пожали плечами — какая-то ересь...

Это было в 1922 году, всех ученых волновала таинственная, но злободневная теория относительности. Не было ничего удивительного в том, что Фридман, который был занят важнейшей научной проблемой — внедрением математики в метеорологию, решил проверить, имеют ли уравнения Общей теории относительности, помимо стационарного, не зависящего от времени решения, найденного Эйнштейном, другие решения — нестационарные, зависящие от времени.

Тогда мало кто из ученых хорошо знал уравнения Общей теории относительности и до конца понимал ее физическую структуру. Но еще меньшее число физиков, буквально единицы владели математическими методами, необходимыми для активной работы с этой теорией. Фридман был одним из них.

Преодолев огромные трудности, он нашел новое — нестационарное, то есть зависящее от времени, — решение уравнений Эйнштейна. Оно утверждало: Вселенная развивается и видоизменяется, все время испытывая расширение. Математика в полном соответствии со здравым смыслом подсказывала, что расширение началось в некоторый начальный момент. Но состояние Вселенной в этот момент — в математической интерпретации — выглядело совершенно невероятным. Вся материя и вся энергия должны были в этот начальный момент быть сосредоточены в бесконечно малом объеме.

Фридман изложил свой результат в статье, опубликованной в солидном физическом журнале. Она осталась незамеченной физиками, а тем более широкой публикой, но Эйнштейн не мог пройти мимо этой статьи. Прочитал ее и совершил необычную для него ошибку. Он переоценил силу своей интуиции. Он все еще находился под гипнозом общепринятой уверенности в вечной неизменности Вселенной. Эта неизменность проявляла себя в масштабах, при которых все грандиозные процессы, все звездные системы кажутся мелкими и не играющими роли.

Проверив, вероятно, без должного внимания, соответствуют ли решения, полученные Фридманом, уравнениям Общей теории относительности, Эйнштейн пришел к выводу, что они неверны. Как это принято в научном мире, Эйнштейн с полным сознанием своей правоты послал в тот же журнал короткую заметку с указанием на ошибку, допущенную Фридманом, и на то, что работа Фридмана, по существу, укрепляет вывод о стационарности Вселенной.

Фридман обсуждал с коллегами свою статью и заметку Эйнштейна. Его поддержали, и он укрепился в своем мнении. В это время физик Ю. А. Крутков собирался в Берлин. Фридман попросил его передать Эйнштейну письмо, в котором разъяснял возникшую ситуацию.

Крутков посетил Эйнштейна. Эйнштейн прочитал письмо и написал вторую краткую заметку в тот же журнал. В нескольких строках сообщил, что, знакомясь со статьей

Фридмана, допустил математическую ошибку, что работа Фридмана правильна и «открывает пути».

Так Ньютон двадцатого века еще раз доказал свою научную принципиальность, уважение к научной этике

Во всех последующих работах, относящихся к космологии, в том числе в попытках создания единой теории поля, Эйнштейн исходил из справедливости решения Фридмана и указывал на его приоритет.

Как показало дальнейшее, Эйнштейн и на этот раз оказался пророком в науке. Работа Фридмана действительно открыла новые пути в познании Вселенной. Это признали все, когда астроном Э. П. Хаббл в 1929 году, систематизируя свои наблюдения, установил, что все далекие туманности разбегаются одна от другой, удаляясь в пространство. Скорость их разбегания тем больше, чем дальше они расположены в момент наблюдения.

Так решение Фридмана выдержало проверку опытом. Для того чтобы не отвлекаться в дальнейшем, следует уже здесь дать несколько пояснений к результату, полученному Хабблом. Чтобы количественно охарактеризовать скорость разбегания туманностей, Хаббл ввел в свои вычисления постоянную величину, определяющую отношение скорости удаления конкретной туманности к расстоянию до нее в момент наблюдения. При этом он применял для измерения скорости километры в секунду, а для измерения расстояния привычную для астрономов единицу длины — парсек. Они называют расстояние, равное миллиону таких единиц, мегапарсек (сокращенно Мпс). Для любителей определенности следует сказать, что парсек (пс) равен $3 \cdot 10^{13}$ км, а мегапарсек равен $3 \cdot 10^{19}$ км.

В 1929 году Хаббл определил постоянную, называемую теперь в его честь постоянной Хаббла, равной 500 километрам в секунду на Мпс. В 1950 году на основе дополнительных наблюдений ее считали равной 200 тех же единиц. В 1957 году астрофизики считали ее равной 75, а в 1962 году большинство из них склонялись к 100. Это показывает, сколь сложным является определение величины постоянной Хаббла. В настоящее время считается, что постоянная Хаббла ближе всего к величине 50 км/сек на Мпс.

Позже было установлено, что постоянная Хаббла не всегда была постоянной. В начале эволюции Вселенной, когда скорость ее расширения была большей, соответственно большей была и постоянная Хаббла. Поскольку постоянная Хаббла по размерности обратна времени, то ее современное значение можно выразить и при помощи единицы времени. При таком выражении она равна 10^{-18} единиц, деленных на секунду. Это показывает, что современная скорость расширения Вселенной очень мала. Разбегание Вселенной тормозится силами тяготения, поэтому скорость разбегания постоянно уменьшается.

Результаты работ Фридмана и Хаббла имели огромное влияние на дальнейшее развитие физики и астрономии. Во-первых, увеличилось количество прямых опытных подтверждений справедливости Общей теории относительности. Во-вторых, стала ясна необходимость дальнейших всесторонних исследований эволюции Вселенной. Благодаря Эйнштейну, Фридману и Хабблу родилось новое научное направление — космология — наука, посвященная изучению Вселенной как целого, изучению ее строения, возникновения и дальнейшей судьбы. Изучению эволюции Вселенной.

Первоначально казалось, что новая наука имеет еще более отдаленное отношение к повседневной жизни человечества, чем астрономия. Но со временем оказалось, что это не так. Космология — пограничная область, принадлежащая и физике и астрономии, — оказалась великим стимулятором прогресса науки. Она стала орудием проверки, подтверждающим и отвергающим результаты исследований в весьма удаленной части науки — в физике элементарных частиц и в работах по реализации величественной цели, поставленной Эйнштейном, — в создании единой физической теории, охватывающей весь мир в его единстве и деталях.

Прошлое и будущее

Первоначально космологические исследования касались двух главных вопросов: будущего Вселенной и ее прошлого.

Вопрос о будущем казался более простым. Для ответа на вопрос о том, будет ли Вселенная расширяться вечно, в теории Фридмана достаточно определить только одну величину. Эта величина — средняя плотность массы во Вселенной. Речь идет о полной массе, включающей все виды вещества и все типы полей, ведь энергия в соответствии с теорией относительности связана с массой, обладает вполне определенной массой. Масса, присущая энергии, или энергия, скрытая в массе, могут быть легко пересчитаны одна в другую — они связаны между собой постоянным множителем. Энергия, заключенная в данной порции вещества, получается умножением соответствующей величины массы на квадрат скорости света. При этом, конечно, все три величины — энергия, масса и скорость света — должны быть измерены при помощи одной системы единиц измерения. Например, при помощи международной системы измерения СИ.

Решение Фридмана таково, что если средняя плотность массы Вселенной меньше некоторого критического значения, то Вселенная будет расширяться вечно и скорость ее расширения никогда не обратится в нуль. Если средняя плотность массы Вселенной больше этого значения, то гравитационные силы, силы взаимного притяжения, постепенно за большое, но конечное время замедлят скорость расширения Вселенной до нуля, затем начнется ее сжатие. Уравнения говорили, что сжатие будет продолжаться до тех пор, пока вся масса Вселенной вновь не соберется в бесконечно малом объеме. После этого, вероятно, снова начнется фридмановское расширение. Затем силы тяготения вновь остановят процесс расширения и опять заставят Вселенную сжиматься. Будет ли это продолжаться вечно, не известно и поныне.

Существует предположение, основанное на Втором начале термодинамики, что размахи расширения постепенно затухают, а длительность каждого цикла «расширение — сжатие» возрастает. В каком состоянии и почему прекратится этот процесс и прекратится ли он, еще не известно, как не известно, справедлива ли гипотеза пульсирующей Вселенной. Если же средняя плотность массы Вселенной окажется точно равной своему критическому значению, то Вселенная окажется безграничной, расширяющейся бесконечно долго, но скорость ее расширения постепенно приблизится к нулю. Однако ученые знают, что во всех других случаях, а вероятно, и в этом пограничное решение оказывается неустойчивым и не реализуется в течение сколь-нибудь длительного времени. Случайные, флуктуационные процессы всегда выводят реальные системы и реальные процессы из таких пограничных неустойчивых состояний.

Таким образом, вопрос о будущем Вселенной превратился в конкретную задачу физиков, астрофизиков и астрономов-наблюдателей. Они стремятся определить, какова действительная величина средней плотности массы Вселенной. Задача необычайной трудности. Причем по мере преодоления одних трудностей сразу возникают новые. Ведь для определения средней массы Вселенной необходимо оценить величину массы, содержащуюся в очень большом объеме, и разделить полученную величину на соответствующий объем.

Для того чтобы результат оказался сколь-нибудь надежным, необходимо взять этот объем таким большим чтобы величина массы, заключенной во всех газовых туманностях, во всех звездных скоплениях — галактиках, во всех одиночных звездах и во всех других космических объектах, оказалась равной массе, заключенной в любом другом объеме Вселенной, имеющем ту же величину.

Трудности оценки масс видимых частей туманностей, звездных скоплений и звезд очень велики, но они несравнимо меньше оценки скрытой массы. Вопрос о скрытой массе возник, когда астрофизики попытались на основе астрономических наблюдений оценить массу отдельных галактик и скоплений галактик. Если мысленно разбить объем этих скоплений на одинаковые части, то окажется, что количество галактик в таком объеме, находящемся вблизи центра скопления, максимально и оно плавно уменьшается при переходе к все более удаленным от центра объемам. Измерив относительные скорости

галактик, вращающихся вокруг центра скопления, и их размеры, астрофизики могут вычислить силы тяготения, удерживающие галактики на их орбитах, а значит, и полную массу скопления галактик.

Уже первые вычисления и наблюдения показали, что суммарная масса всех звезд в каждой галактике в 10–30 раз меньше той, что дают вычисления по способу, указанному выше. После открытия скоплений скоплений галактик — сверхскоплений — история повторилась. Аналогичные вычисления приводили к значениям массы в сверхскоплениях, в 20 раз превосходящую суммарную массу видимых объектов, входящих в галактики. Так в астрофизике возникло понятие скрытой массы. В понятие скрытой, а точнее, труднонаблюдаемой массы астрономы объединяют массу холодной межзвездной пыли и пылевых облаков, проявляющих свое присутствие только тем, что они поглощают свет звезд и других источников, расположенных за ними. В скрытую массу входит и межзвездный газ, различные виды излучений, невидимые холодные останки звезд, планеты и т. п. Но оценки суммарной массы всех этих типов давали величины, много меньшие, чем следует из расчетов, проведенных на основе наблюдений. Кроме того, остается неясной величина скрытой массы, рассредоточенной в огромных объемах пространства, разделяющего между собой сверхскопления галактик. Неизвестен и вклад черных дыр, таинственных объектов, о которых будет сказано ниже.

В последнее время увеличилась вероятность того, что нейтрино обладают массой покоя. Хотя величина массы каждой из этих частиц, по оценкам, очень мала, их так много, что они могут существенно сдвинуть величину средней плотности масс в сторону ее увеличения. Роль нейтрино в образовании скрытой массы мы более подробно обсудим позже.

Все более точные измерения, все более тонкие теоретические оценки приводят к тому, что результирующее значение средней плотности массы во Вселенной очень близко к критическому значению. Причем пределы, в которых заключено истинное значение средней плотности массы Вселенной, все более сжимаются к критическому значению. Вопрос все еще остается открытым. Работа продолжается. Ясно лишь одно: только достоверная оценка массы покоя нейтрино, подтверждение того, что она отлична от нуля, и точное измерение ее величины могут существенно изменить результат, вывести его за границы современных оценок, вывести в сторону увеличения. То есть привести к реализации варианта пульсирующей Вселенной, что со всей остротой поставит вопрос о том, сколь долго будут продолжаться эти пульсации и чем они закончатся.

Вопрос о начале, о возникновении Вселенной оказался еще более трудным, еще более принципиальным. Он тревожил философов, пожалуй, больше, чем физиков. Ведь возникал вопрос о том, как и из чего появилась Вселенная, и вопрос о том, что было до ее появления. Некоторые философы считали незаконной даже саму постановку этих вопросов. Другие с радостью увидели здесь научный вариант библейского мифа о сотворении мира.

Физиков беспокоило иное. Нужно было понять, как огромная масса Вселенной могла сосредоточиться в бесконечно малом объеме, с которого она начала расширение в соответствии с решением Фридмана. Единственный разумный выход виделся в том, что решения Фридмана вместе с уравнениями Эйнштейна теряют силу, когда плотность массы превышает некоторый очень большой предел. Внутри этого предела действуют другие, еще не известные уравнения, описывающие эти закономерности. На это указывал сам Эйнштейн. Возможно, здесь проявляются квантовые закономерности, о которых он писал в связи с излучением гравитационных волн, новые, еще не известные правила игры, игры Природы.

Предел, за которым теряют силу Общая теория относительности и современная квантовая физика, возможно, совпадает с удивительными границами, установленными Планком задолго до появления этих теорий.

К мысли о существовании подобных границ Планк пришел после того, как логика науки привела его к замечательному открытию — непонятной постоянной величине, позднее названной его именем.

К этой постоянной Планк пришел после длительных настойчивых попыток описать свойства излучения «абсолютно черного тела» — тела, способного полностью поглощать электромагнитные волны любой длины, совершенно не отражая их.

Моделью «абсолютно черного тела» может служить отверстие в полном сосуде с темной шероховатой внутренней поверхностью. Любая электромагнитная волна, вошедшая внутрь через это отверстие, будет полностью поглощена, а ее энергия нагреет стенки полости. Со своей стороны, нагретые стенки полости излучают электромагнитные волны, которые частично выходят наружу сквозь отверстие в стенке полости.

Планк знал, что все попытки описать это излучение, исходя из уравнений Максвелла и молекулярно-кинетической теории, приводили к противоречию с результатами опытов.

Размышляя об этой загадке, Планк вспомнил, что великий физик-теоретик Больцман как-то сказал ему, что эту проблему невозможно решить, не предположив, что здесь играет роль какая-то дискретность. Больцман не уточнил, что он имел в виду. Убедившись в бесплодности всех попыток, основанных на общепризнанных взглядах, Планк написал странную формулу, в которой процесс передачи энергии между электромагнитным полем и веществом происходил порциями — квантами.

Так в науку вошли порции энергии — кванты — и описывающая эти порции величина — знаменитая постоянная Планка, или «квант действия».

Формула, найденная интуитивно, решила задачу. Она правильно описывала свойства излучения «абсолютно черного тела» — от самых длинных до сколь угодно коротких волн.

Физики давно привыкли к тому, что большинство физических величин тесно связано с тремя величинами — длиной, интервалом времени и массой. Выбрав произвольно единицы измерения этих величин, например сантиметр длины, секунду времени и грамм массы, можно выразить через них единицы большинства остальных величин.

Планк заметил, что введенная им постоянная, которую теперь называют постоянной Планка, имеет в физике гораздо более широкое значение, чем он думал, вводя ее для устранения ультрафиолетовой катастрофы*.

Планк обнаружил, что его постоянная играет в науке не меньшую роль, чем постоянная тяготения в законе Ньютона и скорость света. Комбинируя эти три постоянные, можно образовать новые единицы любой размерности, например новые единицы длины, времени и массы. Эти новые единицы, если их измерить сантиметрами, секундами и граммами, оказываются очень малыми: планковская единица длины равна $1,6 \cdot 10^{-33}$ см, планковская единица времени равна $5,3 \cdot 10^{-44}$ с, планковская единица массы равна $2,2 \cdot 10^{-58}$ г. Планк правильно воспринял этот намек. Новые единицы неудобны в обычных измерениях, но, возможно, они окажутся естественным масштабом процессов в микромире.

Для дальнейшего имеет большое значение еще одна планковская единица, единица плотности. Плотностью, как известно, называется отношение массы к объему. Взяв соответствующие цифры, написанные выше, легко убедиться в том, что планковская единица плотности, переведенная в отношение граммов к кубическим сантиметрам, потрясюще велика. Она равна $5 \cdot 10^{93}$ г/см³. Эта плотность намного превышает плотность вещества внутри ядер атомов или плотность внутри нейтронных звезд. Эта плотность играет, однако, важную роль в попытках выяснения физических процессов, протекающих в начале фридмановского расширения Вселенной, когда все вещество и вся энергия были спрессованы в ничтожно малом объеме.

Только спустя половину века стало ясно, что планковские единицы действительно указывают пределы применимости известных нам законов природы. Теория, способная работать внутри этих малых границ, не создана до сих пор. Однако вскоре после окончания второй мировой войны ученые начали шаг за шагом приближаться к этим рубежам.

Большой взрыв

Для того чтобы получить какие-либо сведения о процессах, происходивших во

Вселенной на ранних стадиях фридмановского расширения, нужно было перейти от кинематического описания к динамическим закономерностям, учитывающим силы, действующие на вещество, закономерностям, определяющим преобразования энергии и видоизменения вещества.

Такую попытку сделал в 1946 году Г. Гамов. Он опирался на термоядерные реакции, которые, как еще в 1940 году установил Г. Бете, порождают энергию, излучаемую Солнцем и другими звездами. Он исходил из исследований строения ядер и из свойств элементарных частиц, известных в то время.

Гамов предположил, что толчком к фридмановскому расширению было неустойчивое состояние, при котором масса, образованная всеми элементарными частицами, была сжата до огромных плотностей и находилась при колоссальной температуре. Он не пытался объяснить, как возникло такое состояние. Но он считал, что при огромном давлении и температуре частицы одного сорта постоянно превращались в частицы других сортов и возникали вновь так, что каждый сорт был в равновесии с другими.

Гамов назвал процесс, положивший начало фридмановскому расширению, Большим взрывом и предположил, что дальнейшее расширение происходило в соответствии с гипотезой Фридмана.

Для того чтобы эта гипотеза превратилась в теорию нужно было проанализировать дальнейшую эволюцию материи, расширяющейся после Большого взрыва.

Решающий шаг был сделан в 1948 году, когда Р. А. Альфер, Бете и Гамов построили первую модель ранней Вселенной, то была умозрительная модель, попытка наполнить конкретным физическим содержанием теорию расширяющейся Вселенной Фридмана. Такое утверждение может показаться кощунственным в отношении Фридмана и в отношении Эйнштейна, но слово «конкретным» в предыдущей фразе делает ее полностью соответствующим действительности. Ведь Общая теория относительности, теория тяготения Эйнштейна оперирует только общими понятиями «материя», «энергия» и «пространство — время». В уравнениях Общей теории относительности присутствуют только общие количественные характеристики: масса, объединяющая массу вещества и массу энергии, и параметры, связывающие кривизну «пространства — времени» с распределением массы в пространстве. Для этой теории не существенно, в каком виде присутствуют материя и энергия, определяющие структуру «пространства — времени». Естественно, что подобной общностью обладает и решение Фридмана.

До работ Гамова и его сотрудников в ходу были звучные, но не наполненные содержанием высказывания о том, что в начале фридмановского расширения Вселенная была «первичным атомом» или каплей ядерной жидкости.

Гамов, Альфер и Бете исходили из первоначальной гипотезы Гамова о том, что в начальный период своего существования Вселенная была заполнена чрезвычайно плотным однородным газом. Он состоял из всех известных в то время элементарных частиц, находящихся в тепловом равновесии с излучением при очень высокой температуре и взаимодействующих между собой посредством полей (электромагнитного и гравитационного), тоже находящихся в тепловом равновесии между собой и с элементарными частицами. Авторы сознательно избегали обсуждения вопроса: была ли Вселенная вначале сосредоточена в точке? Они начинали свой анализ с того момента, когда Вселенная занимала малый, но не бесконечно малый объем. Предполагалось, что этот газ с самого начала заполнял все пространство и расширялся вместе с ним. Они считали, что все известные законы физики не изменяются со временем и действовали с самого начала расширения Вселенной.

Теория исходила из того, что расширение Вселенной вначале протекало чрезвычайно быстро, взрывоподобно, что дало название теории — Большой взрыв. В ходе расширения величина плотности вещества и энергии, усредненная по большим областям, убывала, оставаясь почти однородной. Расчеты основывались на предположении, что, несмотря на быстрое развитие Большого взрыва, быстрое расширение «пространства — времени»,

изменения всех характеристик вещества и энергии, за исключением плотности и температуры, происходили относительно медленно и не влияли на изменения плотности и температуры.

Теперь приходится лишь удивляться, как первоначальный вариант теории Большого взрыва позволил получить несколько важнейших результатов, впоследствии подтвержденных астрономическими наблюдениями! Ведь со временем выяснилось: эта теория основывалась на ошибочном значении постоянной Хаббла. Мы уже упоминали о том, что значение этой величины, определенное первоначально Хабблом, в 10 раз превосходило значение, полученное позднее с применением более точных методов. Величина этой постоянной, известная в 1946 году, привела Гамова к выводу о том, что с момента Большого взрыва, с начала фридмановского расширения Вселенной, прошло «всего» 2 миллиарда лет. Это противоречило возрасту старейших земных пород, оцененному в то время геофизиками величиной около 4 миллиардов лет. «Небольшое» — всего в два раза — различие казалось Гамову несущественным, так как обе величины были оценены недостаточно точно. Но близость этих величин приводила к неизбежному выводу о том, что Земля и Солнце сформировались из первичного вещества когда-то в начальных стадиях Большого взрыва. Пришлось принять, что к тому времени в ходе Большого взрыва уже образовались все химические элементы вплоть до урана. Это казалось возможным только в условиях предельно высоких температур. Так, по существу, утвердилось мнение о том, что Большой взрыв происходил в условиях чрезвычайно высокой температуры, а теорию Гамова иногда называют теорией горячей Вселенной.

Дальнейшее уточнение теории Большого взрыва произведено Альфером и Гамовым вместе с Р. Германом. Теперь они предположили, что Большой взрыв произошел, когда Вселенная состояла только из нейтронов. В то время уже было известно, что массивные звезды, сжимаясь в конце своей эволюции, приходят в состояние, когда практически все их вещество преобразуется в нейтроны.

Исходя из этого, можно было предположить, что и все вещество Вселенной, первоначально сжатое до очень высокой плотности при огромной температуре, состояло из нейтронов. Затем произошел Большой взрыв, нейтронная Вселенная начала стремительно расширяться. При этом нейтроны постепенно превращались в протоны, электроны и антинейтрино, как это и теперь происходит со свободными нейтронами.

В процессе расширения плотность и температура быстро падали. В некоторый момент температура опустилась настолько, что случайно столкнувшиеся нейтрон и протон уже могли удержаться вместе, образуя дейтон — ядро атома дейтерия. Затем, путем последовательных присоединений нейтронов и протонов, возникли ядра всех известных элементов.

Альфер и Герман установили, что в результате таких последовательных захватов можно прийти к наблюдаемому ныне соотношению количества различных легких элементов. Но необходима жесткая предпосылка: первоначальное отношение числа фотонов к числу ядерных частиц должно было быть порядка миллиарда. Учитывая это и воспользовавшись определенной в то время астрофизиками плотностью ядерных частиц в космическом пространстве, они предсказали, что от ранней Вселенной должно остаться электромагнитное излучение с температурой 5К. (Напомню, что буква К означает градусы Кельвина). А на каждое ядро гелия должно приходиться по 10 протонов.

Это предсказание прошло совершенно незамеченным.

Вскоре выяснилось, что вычисления Альфера, Германа и Гамова были не совсем правильными. В 1950 году Е. Хаяши показал, что следует отказаться от предположения о том, что в начале эволюции Вселенная содержала только нейтроны и что они распадались по законам радиоактивного распада. Более вероятной казалась первоначальная гипотеза Гамова о том, что в первые мгновения Большого взрыва существовала плотная горячая плазма. Пришлось принять, что эта плазма содержала нейтроны и протоны, электроны и позитроны, нейтрино и антинейтрино. В 1953 году Альфер, Герман и Дж. Фоллин (младший)

пересчитали модель в соответствии с уточнением Хаяши. Они вновь пришли к соотношению содержания гелия и водорода, совпадавшему с наблюдениями астрономов (одно ядро гелия на каждые десять протонов). Но за дальнейшим синтезом химических элементов они не проследили. Возможно, их остановило указание Э. Ферми и А. Туркевича, обративших внимание на отсутствие в природе ядер с пятью и с восемью ядерными частицами. Из этого следовало, что такие ядра очень неустойчивы. Поэтому невозможно ожидать, что в горячей плазме простым присоединением нейтронов или протонов рождаются ядра более массивные, чем гипотетическое ядро бериллия-8.

В 1952 году Э. Сольпитер показал, как, несмотря на отсутствие ядра с пятью ядерными частицами, путем последовательного присоединения нейтронов и протонов в не слишком горячей плазме могут возникать не только ядра изотопов водорода и гелия, но и ядра изотопов лития.

Современная теория нуклеосинтеза в ранней Вселенной, приводящая на определенной стадии развития после Большого взрыва к возникновению легких ядер, была создана лишь в 1964 году Я. Б. Зельдовичем и независимо Ф. Хойлом и Р. Тайгером, а также П. Пиблсом.

После этого стало общепризнанным, что все химические элементы, следующие за литием, образовались в недрах звезд и при взрывах сверхновых. К этому нам еще предстоит возвратиться.

Прежде чем расстаться с моделью Альфера, Германа и Гамова, нужно еще раз обратить внимание на то, что ее авторы в то время находились под влиянием общепринятой тогда величины постоянной Хаббла. Но величина постоянной Хаббла характеризует скорость расширения Вселенной, а значит, и время, прошедшее от Большого взрыва до наших дней.

В соответствии с принятым в сороковых годах значением постоянной Хаббла возраст Вселенной был оценен в границах от 1 до 4 миллиардов лет, что сравнимо с возрастом Земли, определенным тогда различными достоверными методами в пределах 4–6 миллиардов лет. Именно это заставило Альфера, Германа и Гамова и в последнем варианте их теории счесть, что все химические элементы были синтезированы в ходе Большого взрыва до образования звезд и планет.

Лишь в семидесятых годах величина постоянной Хаббла была уточнена и было принято ее современное значение а возраст Вселенной оказался где-то между 13 и 20 миллиардами лет. Чаще всего говорят о 15 миллиардах лет. Именно это позволило пересмотреть теорию нуклеосинтеза и разработать более подробный сценарий образования звезд, включающий первый этап, на котором рождались и гибли звезды первого поколения, состоявшие из водорода и гелия. Лишь позже из элементов, синтезированных в ходе эволюции звезд первого поколения, возникли знакомые нам звезды второго поколения. К этому мы еще вернемся.

Первоначальный вариант теории расширяющейся Вселенной, созданный Фридманом, содержал лишь один результат, поддающийся проверке опытом. Этим результатом был сам процесс расширения. Безупречность теории была подтверждена авторитетом Эйнштейна. На вопрос о том, имеет ли это расширение реальный смысл, ответил Хаббл: да, она расширяется, как предсказал Фридман.

Модель Большого взрыва тоже привела к ряду результатов, поддающихся опытной проверке. Среди них — процесс образования ядер легких элементов из протонов и нейтронов. Это произошло после того, как расширение привело к понижению температуры ниже уровня, при котором тепловые соударения с другими протонами и нейтронами и воздействие излучения уже не могут разрушить образовавшиеся ядра. При этом модель позволяет проследить за ходом образования различных ядер, базируясь на результатах физики элементарных частиц и ядерной физики. Таким путем была вычислена распространенность легких ядер.

Несмотря на то что модель Гамова и его соавторов основывалась на неверном значении постоянной Хаббла, они смогли вычислить, что в современной Вселенной большая часть вещества существует в виде водорода (70 %), а меньшая часть в виде гелия (30 %). Все

остальные элементы в сумме не составляют и нескольких процентов вещества Вселенной, так что их количество укладывается в пределы тех ошибок, с которыми вычислено количество водорода и гелия.

Это «предсказание» удивительно хорошо совпало с наблюдением астрофизиков, что сильно укрепило уверенность в правильности теории Большого взрыва, несмотря на первоначальную неясность с образованием тяжелых ядер.

Уточненная модель Большого взрыва немного изменила значение температуры электромагнитного излучения, оставшегося от Большого взрыва.

Расчеты показали, что к нашему времени оно должно охладиться до температуры порядка 10К (вместо первоначального результата 5К).

Следует помнить, что между 1948 и 1953 годом никто не помышлял о том, что можно зафиксировать существование излучения, обладающего столь низкой температурой. Эта часть работы, это предсказание не привлекло внимания ученых и оказалось забытым. Но в нем таился зародыш одной из самых впечатляющих сенсаций науки наших дней.

В 1963 году группа теоретиков, работавших в Принстоне во главе с Р. Дикке, снова заинтересовалась теорией Большого взрыва. За прошедшее десятилетие теория элементарных частиц пережила период бурного развития как в области фундаментальных моделей, так и по методам расчетов и полученным результатам. Значительный прогресс пережила и радиоастрономия. Были построены крупные малозумящие антенны для приема радиоволн сантиметрового диапазона, приходящих из космоса. Одновременно еще более молодая квантовая электроника позволила создать принципиально новые квантовые усилители радиоволн, основанные на применении открытого Е. К. Завойским парамагнитного резонанса. Радиоприемники с такими усилителями могли легко зафиксировать радиоизлучение, интенсивность которого была бы эквивалентна шумам сопротивления, нагретого лишь до нескольких единиц градусов Кельвина.

Один из сотрудников Дикке, П. Пиблс, вновь провел расчеты протекания начальной стадии эволюции Вселенной, следуя стандартной модели Большого взрыва, но с учетом новейших достижений физики элементарных частиц. Расчет подтвердил, что со всех направлений из удаленных областей Вселенной к Земле приходит равновесное радиоизлучение, максимум интенсивности которого после новых вычислений оказался близким к 7К. Основной отличительной чертой этого излучения является независимость его интенсивности от направления в пространстве и его спектр, являющийся характерным шумовым спектром равновесного теплового излучения. Лабораторный жаргон присвоил этому излучению наименование «реликтовое излучение», что подчеркивает его происхождение. Ведь это действительно реликт — остаток давно минувших времен и событий. Наименование сохранилось и вошло в международный словарь науки.

По поручению Дикке двое из его сотрудников начали готовить сверхчувствительный радиоприемник и крупную антенну радиотелескопа для поиска реликтового излучения на длине волны около 3 см.

Открытие

В это время американские радиоастрономы А. Пензиас и Р. Вильсон готовили к очередным экспериментам оригинальную рупорную антенну. Эта большая антенна была построена для исследования возможности создания космической системы радиосвязи, в которой спутник типа «Эхо» — большой баллон из тонкой металлизированной пленки, выведенный на околоземную орбиту и раздутый газом, — должен был служить зеркалом, отражающим радиоволны, излученные передатчиком.

После того как эксперименты с «Эхом» были закончены, Пензиас и Вильсон собирались применить эту антенну в качестве радиотелескопа и поэтому тщательно изучали ее шумовые свойства. Они оценивали вклад различных источников шумов в принятых радиоастрономами единицах — градусах Кельвина. За единицу был принят шум,

испускаемый сопротивлением величиной в один Ом, нагретым на 1К. Различные источники шумов вносили свой вклад в общую шумовую температуру антенны, а исследователи старались свести шумы антенны к минимуму. Как и другие радиоастрономы, они использовали для калибровки антенны шумы, приходящие из космического пространства, стремясь при этом точно учесть путем вычислений неизбежные шумы, порождаемые земной атмосферой, и шумы, излучаемые поверхностью Земли, попадавшие в антенну, даже когда она была обращена к небу. В последнем случае сказывалось отклонение конструкции антенны от расчетной и явление дифракции, то есть изгибание направления распространения радиоволн вблизи края антенны.

Закончив эти исследования, Пензиас и Вильсон обнаружили, что измеренный ими шум антенны на 3 К превосходит ее расчетный шум с учетом всех мыслимых внешних шумов. Необычно было, что величина избыточного шума не зависела от направления антенны. В процессе исследования антенну поворачивали от зенита почти до горизонта и вращали ее вокруг вертикальной оси так, что она обегала все участки горизонта. Таинственное шумовое излучение не изменялось ни со временем суток, ни в течение года.

В 1964 году, когда измерения закончились, исследователи приобрели полную уверенность в том, что избыточное радиоизлучение, идущее с удивительным постоянством к Земле, одинаково со всех сторон, — реальность.

Неожиданная, непонятная, но несомненная реальность. Они были недостаточно подготовлены даже для того, чтобы выдвинуть сколько-нибудь удовлетворительную гипотезу, способную объяснить наблюдаемый ими избыточный шум. Никто из сотрудников большой и высококвалифицированной научно-исследовательской организации, в которой они работали, тоже не мог сказать ничего определенного. Но цепь случайностей в конце концов привела их к Пиблсу, научный доклад которого слышал знакомый их знакомого.

Ничего не зная о теории Большого взрыва, Пензиас и Вильсон связались с Пиблсом. Личный контакт поставил все на свои места — Пиблс поздравил радиоастрономов с открытием. Да, обнаруженный ими избыточный шум не ошибка, не влияние какого-то неучтенного ими источника помех. Это открытие. И оно имеет огромное принципиальное значение. Вскоре это открытие — результат тщательно проведенного эксперимента — принесло им Нобелевскую премию.

Но на этом история реликтового излучения не окончилась.

Сразу после создания Общей теории относительности Эйнштейн разъяснял, что пространство обладает вполне определенным свойством — кривизной, причем величина и характер искривления пространства в каждой его точке вызывается материей, распределенной по всей Вселенной. Эта кривизна может быть обнаружена и изучена, как и все физические характеристики остальных реальных объектов. Это не было возвращением к Ньютону.

Уже Специальная теория относительности вывела за пределы науки абсолютное однородное евклидово пространство и абсолютное время механики Ньютона как ненужные и приводящие к недоразумениям абстракции.

Эйнштейн отлично понимал, что равномерное движение в реальном искривленном пространстве может быть в принципе измерено. Он даже несколько раз писал о том, что Общая теория относительности, в отличие от Специальной теории относительности, выявив реальные свойства пространства, одновременно привела к принципиальной возможности наблюдения «нового эфирного ветра» — то есть обнаружения равномерного движения измерительного прибора в мировом пространстве.

Эйнштейн писал об этом, когда все уже признали отсутствие эфира, невозможность обнаружения «эфирного ветра» в опытах, подобных опыту Майкельсона, и никто не предполагал реальной возможности обнаружения того, что он назвал «новым эфирным ветром». Он тоже не знал, как можно судить о перемещении прибора относительно искривленного пространства, не располагая возможностью независимо определять свойства этого пространства. В то время никто не предполагал существования реликтового

радиоизлучения, заполняющего пространство и отображающего его свойства.

Поэтому Эйнштейн не думал о том, что можно поставить реальный опыт, способный продемонстрировать «новый эфирный ветер».

Прошли годы, в 1976 году группа американских ученых в составе Г. Ф. Смута, М. В. Горенштейна и Р. А. Маллера задалась целью обнаружить «новый эфирный ветер». Увеличив чувствительность своей аппаратуры в тысячу раз по сравнению с имевшейся у Пензиаса и Вильсона и подняв ее на высоту 15 км, за пределы плотных слоев земной атмосферы, чтобы уменьшить величину атмосферных шумов, они обнаружили пространственную несимметрию реликтового излучения. Несимметрия составляла всего тысячную долю градуса Кельвина, но она была установлена надежно. Температура излучения, приходящего с того направления, куда движется Земля в космическом пространстве, была на 0,003 К выше, а температура излучения, приходящего с противоположной стороны, оказалась на такую же величину ниже, чем точно установленное среднее значение температуры реликтового излучения (2,7 К). Это было одним из проявлений эффекта Доплера. Точность измерения была столь велика, что на фоне вращения Солнечной системы вокруг центра Галактики и движения Галактики относительно других удаленных галактик можно было выделить сравнительно медленное (30 км/с) движение Земли по ее орбите вокруг Солнца.

Так был обнаружен «новый эфирный ветер». Так было установлено, что с учетом «нового эфирного ветра» интенсивность реликтового излучения, приходящего из любой точки небосвода, не отличается и на одну десятитысячную градуса Кельвина от интенсивности реликтового излучения, приходящего от любой другой точки небосвода. Астрофизики называют такую независимость от направления изотропностью. Изотропность реликтового излучения, как мы увидим ниже, играет решающую роль при оценке достоверности различных теорий эволюции Вселенной.

Забегая вперед, скажем, что такая оценка позволит составить более детальное представление о свойствах Вселенной в тот период, когда при температуре порядка 4000 К она стала прозрачной для электромагнитных волн. От этого зависит, приходит ли реликтовое излучение одинаково интенсивным со всех направлений или его интенсивность зависит от направления. А это непосредственно связано с тем, сколь однородной была Вселенная в тот отдаленный период.

Первооткрыватели «нового эфирного ветра» сообщили о том, что, учтя его, они не обнаружили изменений интенсивности реликтового излучения в пределах чувствительности их аппаратуры, составлявшей около 10-4 К.

Две группы ученых, помещая свои приборы на высотных баллонах и самолетах, сообщили в 1980 и 1981 годах об обнаружении азимутальной асимметрии, то есть о зависимости интенсивности реликтового излучения от направления. Однако две другие группы опровергли в 1983 году их результаты.

Еще в конце шестидесятых годов Н. С. Кардашев из Института космических исследований АН СССР (ИКИ) обосновал преимущества исследования реликтового излучения при помощи приборов, помещенных на искусственном спутнике Земли. При этом устраняются шумы и помехи, порожденные атмосферой и различными наземными электрическими устройствами. Вторым существенным преимуществом является много большее время работы приборов. Один год работы на спутниках эквивалентен полувековым исследованиям, основанным на сравнительно кратковременных полетах баллонов и высотных самолетов.

Спутниковый эксперимент был выполнен сотрудниками ИКИ И. А. Струковым и Д. П. Скулачевым на спутнике «Прогноз-9». Они опубликовали в январе 1984 года первые результаты своей работы в статье под названием «Эксперимент «Реликт». Первый результат».

Первый результат таков: если азимутальная асимметрия реликтового излучения существует, то она не превышает 0,2 м К (м К — милликельвин). Последующая обработка

полученных опытных данных позволяет считать, что эта асимметрия не превышает 10 от средней интенсивности реликтового излучения, имеющего температуру около 2,7 К.

Ученые, конечно, не остановятся на достигнутом, потому что им уже видны пути дальнейшего улучшения аппаратуры, способной длительно работать в космическом пространстве.

Открытие реликтового излучения сыграло для теории Большого взрыва такую же роль решающего эксперимента, которую для Общей теории относительности сыграло обнаружение искривления световых лучей в окрестностях Солнца.

Теория Большого взрыва сразу получила признание Физиков и астрофизиков.

Многие интересуются, почему реликтовое излучение было обнаружено только в 1965 году (дата публикации статьи Пензиаса и Вильсона и статьи Дикке, Пиблса и др.) и то случайно, если его существование было предсказано еще в 1948 году.

Причин много. Прежде всего нужно учесть, что радиофизики не знали работ Гамова и его сотрудников, а значит, не знали об их предсказании. Физики не подозревали, что такое слабое излучение можно зафиксировать и измерить.

В свою очередь физики-теоретики, обнаружив огрехи в работе Гамова и его сотрудников (ошибка с постоянной Хаббла, ошибка с синтезом тяжелых ядер), надолго потеряли интерес к теории Большого взрыва.

Мы уже знаем, что только в 1964 году Дикке и его сотрудники вновь оценили температуру реликтового излучения и начали подготовку к его наблюдению. Одновременно и независимо Зельдович и его ученики А. Дорошкевич и И. Новиков тоже изучали раннюю историю Вселенной, чтобы решить, была ли она в самом начале раскаленной или холодной. В короткой статье Дорошкевича и Новикова сказано, что решить этот вопрос можно, наблюдая, существует ли реликтовое излучение, с необходимостью следующее из теории Большого взрыва. В этой статье они указывали, что наиболее подходящей антенной для такого эксперимента является большая рупорная антенна лаборатории «Белл» в Кронфорд Хилле, та самая антенна, при помощи которой Пензиас и Вильсон сделали свое открытие, ничего не зная об этой статье.

Лишь недавно сотрудник Института общей физики АН СССР Т. А. Шмаонов вспомнил, что в середине пятидесятих годов он при помощи рупорной антенны изучал радиоволны длиной в 3,2 см, приходящие из космоса. Учтя все возможные помехи, он пришел к выводу, что из космоса со всех сторон приходит радиоизлучение с температурой 4+3 К. Этот результат он опубликовал в 1957 году в журнале «Приборы и техника эксперимента», но Шмаонов не пытался установить источник этого излучения.

В те годы он не мог получить помощи теоретиков, ибо теория Большого взрыва была прочно забыта, а интерес к ней возродился лишь через 7 лет.

Позже, когда в 1964 году вновь возник интерес к Большому взрыву, никто не помнил о статье Шмаонова. Никто не сообщил Дорошкевичу и Новикову, указавшим на антенну в Кронфорд Хилле, что в Советском Союзе тоже есть подходящая антенна и что реликтовое излучение уже обнаружено. Не помнил об этом и сам Шмаонов.

Статья Шмаонова воскресла и вновь возникла из журнальных дебей через 27 лет после ее опубликования, через 18 лет после открытия Пензиаса и Вильсона и через 5 лет после вручения им Нобелевской премии.

Так еще раз подтвердилась старая истина: открыть — не значит увидеть, а значит — понять.

Первый сценарий

Шли годы. Многие ученые уточняли теорию Большого взрыва. В начале семидесятих годов удалось с большими подробностями воссоздать (на бумаге) эволюцию Вселенной.

При этом физики были все еще вынуждены отказаться от описания «самого начала», когда, в соответствии с теорией Фридмана, Вселенная была сжата в бесконечно малый

объем.

В середине семидесятых годов сценарий, описывающий эволюцию Вселенной, можно было начать только с дистанции в одну сотую секунды от начала Большого взрыва.

Основываясь на знаниях, накопленных к 1975 году, ученые нарисовали первый кадр сценария «Большой взрыв»: через 0,01 с после Большого взрыва температура Вселенной составляет 100 миллиардов градусов (10^{11} К). Она заполнена однородной по свойствам смесью вещества и излучения. Существенно, что свойства Вселенной в этот момент совершенно не зависят от того, что было раньше. Все последующее определяется тем, что при температуре 10^{11} К электрический заряд Вселенной и разность между числом частиц и античастиц в ней очень малы или равны нулю.

Вещество, образующее Вселенную в этот момент, представлено электронами и нейтрино с их античастицами, а излучение существует в форме фотонов. По оценкам, выполненным к 1975 году, каждый из этих сортов частиц был представлен почти в одинаковом количестве (точнее, на каждый фотон приходилось по 7/4 электронов, позитронов, нейтрино и антинейтрино). Кроме того, на каждый миллиард нейтрино или фотонов присутствует всего примерно один протон или нейтрон. Плотность этой смеси огромна. Она в 3,8 миллиарда раз превосходит плотность современной воды.

При такой огромной плотности и температуре электроны и позитроны (частицы материи) постоянно превращаются в фотоны (частицы света), а фотоны с той же интенсивностью порождают электронно-позитронные пары. Одновременно протоны превращаются в нейтроны и обратно, причем в этих превращениях участвуют электроны и нейтрино со своими античастицами.

Размер Вселенной в этот момент неизвестен, но это незнание не влияет на дальнейшую эволюцию. Ясно лишь, что, оставаясь в состоянии подвижного равновесия, Вселенная чрезвычайно быстро расширяется, увеличиваясь на 1 % за 0,02 с.

Расширяясь, Вселенная быстро остывает, но скорость ее расширения постоянно убывает, так как гравитационные силы препятствуют расширению.

Следующий характерный момент, следующий кадр сценария отстоит на 0,1 с от предыдущего. Температура успела упасть примерно втрое, до $3 \cdot 10^{10}$ К. Температура Вселенной уменьшается при расширении аналогично тому как остывает расширяющийся газ. Электроны, позитроны, нейтрино, антинейтрино и фотоны все еще пребывают в равновесии между собой, но вследствие падения температуры радиоактивный распад нейтронов, превращающихся в протоны, электроны и антинейтрино, уже не компенсируется обратным превращением протонов в нейтроны. В результате к этому моменту в состав ядерных частиц входит 38 % нейтронов на 62 % протонов. Скорость расширения Вселенной, убывающая как квадрат температуры, уменьшилась так, что расширение на 1 % происходит только за 0,2 с.

Следующий характерный момент, а значит, и следующий кадр отстоит на 1 с от начала отсчета. Вследствие расширения температура понизилась еще втрое — до 10^{10} К. Теперь плотность вещества упала настолько, что нейтрино перестали взаимодействовать с остальными частицами. Из-за падения температуры электроны и позитроны превращаются в фотоны чаще, чем рождаются из них, поэтому количество электронов и позитронов начинает уменьшаться, а количество фотонов — возрастать. Распад нейтронов продолжается. Поэтому их баланс теперь: 24 % нейтронов и 76 % протонов. Еще примерно через 10 с температура успевает упасть примерно втрое (до $3 \cdot 10^9$ К), рождение электронов и позитронов из фотонов прекращается. Но, сталкиваясь между собой, электроны и позитроны по-прежнему превращаются в фотоны. Их количество быстро уменьшается, а количество фотонов соответственно увеличивается. Теперь Вселенная состоит преимущественно из фотонов с небольшой примесью частиц и античастиц, а также из продолжающих независимое расширение нейтрино. Распад нейтронов приводит к дальнейшему уменьшению их количества до 17 % при 83 % протонов. Расширение и охлаждение продолжается.

Следующий важный этап происходит чуть позже чем через 3 минуты, когда температура падает ниже 10^9 К, ниже одного миллиарда градусов Кельвина. При этой

температуре начинается нуклеосинтез: ядра дейтерия, образующиеся при столкновении протона и нейтрона, уже не распадаются при взаимодействии с другими частицами и фотонами. Более того, они могут присоединять к себе еще один протон или нейтрон и превращаться соответственно в ядра гелия-3 и в ядра трития. А они, в свою очередь, присоединяя соответственно еще один нейтрон или протон, превращаются в гелий-4. Кроме того, в результате редких соударений ядра гелия-4 с ядром дейтерия возникает небольшое количество ядер лития-6, а при соударении ядер гелия-4 с ядрами трития возникает небольшое количество ядер лития-7. Ядра более тяжелых атомов не образуются этим путем, ибо не существует стабильных ядер с пятью или восемью ядерными частицами.

К моменту, непосредственно предшествующему нуклеосинтезу (образованию ядер), распад нейтронов свел их количество примерно до 12,5 % на 87,5 % протонов. Практически все нейтроны затем оказались связанными в ядрах гелия-4. В ядре гелия-4 содержится по два нейтрона и два протона, следовательно, ядра гелия составляют по массе примерно 25 % при 75 % свободных протонов.

Когда процессы нуклеосинтеза закончились и температура Вселенной упала до $3 \cdot 10^8$ К, плотность Вселенной упала до 10 % от современной плотности воды. Вселенная состоит на 31 % из нейтрино и антинейтрино и на 69 % из фотонов. Ядра гелия, свободные протоны и электроны составляют ничтожную часть массы Вселенной, причем на каждый протон (свободный или входящий в ядра гелия) приходится один электрон...

На этом сценарий обрывается, ибо в дальнейшем состав Вселенной не будет заметно изменяться. Она будет продолжать расширяться, причем скорость расширения и температура постепенно уменьшаются.

Но в ранней Вселенной был еще один важный момент. Он произошел примерно через пятьсот — семьсот тысяч лет после Большого взрыва. Температура Вселенной к этому времени упала до 4000 К, и электроны смогли прочно соединиться с ядрами гелия и с протонами, образуя атомы гелия и водорода. Ни соударения между атомами, ни взаимодействия с фотонами при этой температуре не способны разрушить такие атомы. Но так как число протонов и электронов было изначально одинаково, то после образования атомов во Вселенной не стало свободных электронов. Вследствие исчезновения свободных электронов Вселенная стала прозрачной для фотонов так же, как при температуре 1010 К, через одну секунду после начала расширения она стала прозрачной для нейтрино. Теперь фотоны продолжают расширяться и остывать вместе с расширением Вселенной, не взаимодействуя с веществом.

Прошло еще пятнадцать миллиардов лет, и вот читатель взял эту книгу и узнал, что в настоящее время в природе должно существовать примерно 25 % гелия и 75 % водорода, а Вселенная должна быть наполнена фотонами — 4 реликтовым электромагнитным излучением с температурой около 3 К.

Оба эти «предсказания» удивительно точно совпадают с экспериментом.

Казалось, на этом можно поставить точку.

Но наука не может остановиться.

От пустоты к вакууму

К тому моменту, когда удалось составить описанный выше сценарий развития Вселенной, ученые добыли новые знания как в ходе чрезвычайно сложных экспериментов с элементарными частицами, так и в попытках понять и описать математически результаты этих экспериментов.

Возникшие на этой основе теории позволили приблизиться к пониманию эволюции Вселенной на еще более ранних стадиях.

При этом существенную роль сыграло изменение взгляда ученых на вакуум. Это может показаться странным тем, кто привык считать понятия «вакуум» и «пустота» синонимами.

Понятие «пустота» тревожило людей издревле. Аристотель пришел к мнению о том,

что пустота невозможна. Он сформулировал это кратко и четко: «Природа не терпит пустоты».

Лишь в 1644 году Э. Торричелли проделал свой знаменитый опыт: он запаял один конец длинной стеклянной трубки, повернул трубку открытым концом вверх и до краев заполнил ее ртутью; затем он закрыл этот конец трубки пальцем и опустил его в чашку со ртутью. Убрал палец — столб ртути опустился. Его высота равнялась 750 мм. В трубке над ртутью было пусто. Торричелли считал, что там ничего нет, даже газа, что там вакуум.

В конце прошлого века И. Стефан, его ученик Больцман и Планк, передавая друг другу эстафету исследования свойств электромагнитного поля, пришли к заключению, что вывод Торричелли требует уточнения. Если в торричеллиевой пустоте нет и следов газа, это не значит, что там нет совершенно ничего. Там обязательно существуют хаотические электромагнитные волны, находящиеся в тепловом равновесии со стенками сосуда. Вскоре (в 1905 году) Эйнштейн установил, что электромагнитное поле в некоторых случаях ведет себя как совокупность особых частиц — квантов электромагнитного поля. Эти кванты теперь называют фотонами.

Так было установлено, что вакуум не пуст.

В вакууме всегда присутствуют фотоны, постоянно испускаемые стенками сосуда, ограничивающего вакуум, и поглощаемые этими стенками. В космосе, где нет стенок, фотоны порождаются всеми материальными частицами, от атомов до звезд. Этот вывод, следующий из классической электродинамики, подтвержден опытом.

Квантовая физика привела к дальнейшему уточнению понятия «вакуум». Из фундаментальных законов квантовой физики следует, что даже при нулевой температуре в каждой точке вакуума постоянно попарно рождаются и тут же исчезают, сливаясь между собой частицы и античастицы любого типа. Физики называют эти пары частиц и античастиц виртуальными. (Название, происходящее от латинского *virtualis* — возможный, могущий появиться.)

Виртуальные частицы не выдумка теоретика, они вступают во взаимодействие с реальными частицами, и это взаимодействие изменяет характеристики реальных частиц. Современные измерительные приборы позволяют зафиксировать эти изменения. Результат таких изменений был с огромной точностью зафиксирован в спектре атомов водорода.

Достаточно сильное поле, например электростатическое, или переменное электромагнитное поле может вызвать превращение виртуальных частиц вакуума в пары реальных частиц и античастиц. Такое рождение электрон-позитронных пар и пар других частиц и античастиц наблюдается во многих опытах.

Среди поразительных свойств вакуума, пожалуй, самое поразительное содержится в ответе на вопрос: обладает ли вакуум свойством гравитации?

Этот вопрос был впервые поставлен Эйнштейном еще в 1917 году. Уже тогда было ясно, что вакуум не пуст, что из него невозможно удалить виртуальные фотоны. А сам Эйнштейн еще за год до того установил, что реальные фотоны реагируют на гравитационное поле, что путь фотонов вблизи массивных тел искривляется. Это искривление наполовину вызвано именно тем, что фотон обладает массой и поэтому подвергается действию поля тяготения.

Но затем Эйнштейн был вынужден приписать гравитационные свойства и самому вакууму. Это было необходимо потому, что он, как мы знаем, исходил из представления о том, что Вселенная, рассматриваемая в целом, вечна и неизменна.

Но решения уравнений Общей теории относительности, полученных при создании этой теории, приводили к тому же, что уравнения Ньютона — силы тяготения — гравитация — должны собрать всю массу Вселенной в один огромный комок или в ряд таких комков. Вывод противоречил опыту. Поэтому, как было рассказано выше, Эйнштейн был вынужден изменить полученные им уравнения, ввести в них наряду с силами тяготения еще силы отталкивания, такие, чтобы они в сумме гасили друг друга в далеких просторах Вселенной. Но сила отталкивания не должна была проявлять себя во всех изученных ранее процессах,

где сила тяготения действует без всяких помех. Значит, сила отталкивания должна быть пропорциональной расстоянию между телами. Эйнштейн назвал дополнительный член, введенный им в уравнения Общей теории относительности, космологическим членом. Этот член проявляет себя только на огромных расстояниях. Эйнштейн считал отталкивание, описываемое космологическим членом, одним из свойств вакуума. Гравитационные свойства материи проявляются в искривлении пространства, в тяготении. Гравитационные свойства вакуума проявляются как сила отталкивания.

Мы знаем, что через несколько лет Фридман нашел нестационарные решения первоначальных уравнений Эйнштейна. Впрочем, сам Фридман заметил, что нестационарное решение возможно и в уравнениях Эйнштейна, содержащих космологический член. Нужно лишь предположить, что силы тяготения и силы отталкивания компенсируют друг друга не полностью. Но было ясно, что введение космологического члена лишь усложняет уравнения, не давая ничего нового.

Сам Эйнштейн писал впоследствии, что введение космологического члена было «самой грубой ошибкой» в его жизни. Казалось, что космологический член канул в небытие.

Но в тридцатых годах он вновь возродился. Мы уже знаем, что первые вычисления величины постоянной Хаббла, определяющей время расширения Вселенной, были завышены в 10 раз. Это давало для возраста Вселенной величину, меньшую возраста Земли. Для того чтобы устранить это противоречие, космологи вернули в уравнения Эйнштейна космологический член. Они рассуждали так. Первоначально, когда мир Фридмана — Эйнштейна только начал расширяться, все вещество было сжато до огромных плотностей в малом объеме. Тогда, рассуждали они, силы тяготения были велики (большая плотность вещества и энергии), а силы отталкивания, обусловленные вакуумом, малы (малые расстояния).

В ходе расширения плотность Вселенной уменьшалась, а ее размеры росли. Соответственно силы тяготения убывали, а силы отталкивания возрастали. В какой-то момент эти силы стали одинаковыми, Вселенная расширялась по инерции. Если ее скорость при этом мала, то этот период может быть очень длительным. Так можно избежать противоречия между возрастами Земли и Вселенной. В конце концов плотность массы Вселенной, а с ней и сила тяготения уменьшатся настолько, что сила отталкивания превзойдет силу тяготения, и Вселенная начнет расширяться ускоренно. Так можно было примирить известное в то время значение постоянной Хаббла с возрастом Вселенной.

Эту гипотезу пришлось отбросить после того, как в пятидесятых годах астрономы уточнили величину постоянной Хаббла. Теперь возраст Вселенной определяют примерно в 15 миллиардов лет. Космологический член снова оказался ненужным.

Космологический член вновь ожил после того, как в 1967 году были открыты квазары и установлено очень большое красное смещение в их спектрах, свидетельствующее о том, что они чрезвычайно быстро удаляются от нас. Если все квазары обладают одинаковой природой, то их видимый блеск должен убывать по мере увеличения красного смещения, которое тем больше, чем дальше квазар. Такое простое соображение противоречило данным, полученным в первые годы наблюдения квазаров. Тогда астрофизики объясняли расхождение отрицательным давлением вакуума, описываемым космологическим членом.

Но постепенно появлялись новые астрономические данные. Оказалось, что отнюдь не все квазары одинаковы и поэтому различия в их блеске обусловлены не только их разной удаленностью.

При этом космологический член опять оказался ненужным.

Но мы скоро увидим, что физика элементарных частиц указывает на возможную большую роль гравитации вакуума, а значит, и космологического члена на ранних стадиях эволюции Вселенной.

Перейдем к современным космологическим сценариям, опирающимся на достижения новейших теории элементарных частиц. Эти космологические теории исходят из наиболее достоверных, полученных из изощренных опытов, физических предположений и

проверенных этими опытами теорий элементарных частиц, подтвержденных дополнительными опытами.

Но прежде чем погрузиться в эту увлекательную область, необходимо вспомнить о той революции в физике элементарных частиц, которая зарождалась в начале семидесятых годов.

ГЛАВА 7

ВЕЛИКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ

Так рождалась сказка о стране чудес.

Л. Кэрролл

Новый подход

В середине нашего века физики убедились: все процессы, происходящие в природе, обусловлены взаимодействием между частицами и полями. Наиболее универсально гравитационное взаимодействие, связанное с гравитационными полями. Оно порождается любыми видами материи и связанной с нею энергией. Гравитационные поля играют решающую роль в крупномасштабных явлениях — в космосе. Их нельзя избежать в нашей земной жизни. Однако они становятся исчезающе малыми в атомных масштабах и поэтому не проявляют себя в процессах, разыгрывающихся внутри атомов и молекул. Зато здесь играют главную роль электромагнитное взаимодействие и электромагнитные поля. Они определяют свойства атомов и молекул, участвуют в радиоактивном гамма-распаде и имеют первостепенное значение в технике, в химических реакциях и биологических процессах.

При радиоактивном бета-распаде наиболее важны взаимодействия, вызывающие распад нейтрона и испускание электронов и позитронов из некоторых ядер. Это взаимодействие было названо слабым взаимодействием. Слабым потому, что оно в 10^{10} раз слабее электромагнитного взаимодействия.

Ряд экспериментов привел физиков к заключению, что при очень высоких энергиях роль слабого взаимодействия увеличивается и оно становится неотличимым от электромагнитного взаимодействия. Такое объединенное взаимодействие названо электрослабым.

Кроме гравитационного, электромагнитного и слабого, существует четвертый вид взаимодействия. Сведения о нем стали достоянием ученых только в середине шестидесятых годов, когда исследования, проведенные при помощи ускорителей, показали, что ядерные частицы, в частности протоны и нейтроны, не являются элементарными частицами.

Постепенно выяснилось, что протон и нейтрон образованы из трех различных комбинаций более элементарных частиц — кварков. В природе существует шесть разновидностей кварков и, соответственно, шесть антикварков. При соединении кварка и антикварка получается мезон, частица, ранее считавшаяся элементарной. При соединении трех кварков получаются протоны и нейтроны и другие тяжелые частицы, называемые барионами. Таким образом, и эти частицы оказались не элементарными.

Объединение кварков (и антикварков) в более сложные частицы осуществляется в результате сильных взаимодействий. Их название показывает, что они в масштабе размера ядра (10^{-13} — 10^{-14} см) очень сильны. Но они кардинально отличаются от остальных взаимодействий своей зависимостью от расстояния. Взаимодействия, с которыми мы познакомились ранее, гравитационное и электрослабое, быстро убывают при увеличении расстояния. Сильное взаимодействие обладает более сложными свойствами. Оно очень быстро растет, когда расстояния увеличиваются за пределы размеров ядра, и резко

уменьшается, когда расстояния становятся меньшими, чем размеры ядра. В результате этого кварки внутри протона и нейтрона ведут себя как свободные частицы. Если же какому-либо из кварков придана очень большая энергия, способная вырвать его наружу, то происходит процесс, с которым физики ранее не встречались. Эта энергия оказывается затраченной на рождение нового кварка внутри частицы (например, внутри протона или нейтрона), из которой мы пытаемся вырвать кварк, и рождение мезона, как бы вылетающего из материнской частицы. Более детальное изучение показывает, что мезон не вылетает как целое из этой частицы, а возникает из выбитого из нее кварка и еще одного кварка, порождаемого в вакууме за счет энергии, затраченной на освобождение кварка из недр протона или нейтрона.

Эти процессы, кажущиеся фантастическими, реализованы и подробно изучены при помощи самых мощных из имеющихся ускорителей заряженных частиц. На основе подобных исследований ученые были вынуждены признать, что при очень высоких энергиях, соответствующих температуре около 1028 К, электрослабые взаимодействия сравниваются по величине с сильными взаимодействиями и сливаются с ними воедино. Физики назвали этот процесс Великим объединением. Это значит, что при температуре, превышающей 1028, все составные частицы (протоны, нейтроны, мезоны и более сложные частицы) распадаются. Все вещество при этом существует в форме кварков и лептонов (этим наименованием обозначают семейство, состоящее из электрона, мюона, их родственника тау-лептона, трех нейтрино и их античастиц). Распад протонов, нейтронов и других составных частиц происходит вследствие того, что при температуре 1028 К частицы могут сближаться на расстояние 10—28 см и ближе. Но на этих малых расстояниях силы, удерживающие кварки внутри составленных из них частиц, уменьшаются практически до нуля.

Все три поля при этом представлены единым полем, а частицы, передающие взаимодействие, обусловленное этим полем, выглядят в этих условиях как необычайно энергичные фотоны.

Это не плод фантазии физиков, а выводы из множества экспериментов, поставленных так, что каждый из них проверяет результаты, полученные в других экспериментах.

Ни один из них не противоречит другим, а если появляется видимость противоречий, то они устраняются по мере дальнейшего проникновения в глубинные свойства материи. Когда это удастся, а пока так было во всех случаях, выявляются новые факты, противоречия исчезают и картина мира становится все более детальной и ясной.

В результате таких исследований физики вынуждены признать, что при еще более высоких температурах, превышающих 1032 К, частицы сближаются так тесно (на расстояние порядка 10—33 см), что гравитационное взаимодействие сравнивается по величине с тем, которое образовано при Великом объединении остальных трех взаимодействий. Физики назвали такое объединение, в котором сливаются все четыре взаимодействия, суперобъединением.

После этого краткого отступления в физику элементарных частиц мы можем возвратиться к тому, как ученые постепенно уточняли сценарий ранних этапов эволюции Вселенной.

Сотрудники Физического института АН СССР Д. А. Киржниц и А. Д. Линде в 1972 году обратили внимание на то, что в ранней истории Вселенной должен был возникнуть критический момент, существенный для понимания хода ее эволюции. Этот момент наступает, когда в ходе фридмановского расширения Вселенной температура раскаленной мешанины элементарных частиц опускается до значения, лежащего около 1028 К. При этом Великое объединение нарушается. Сильное взаимодействие отделяется от электрослабого. Различие между ними увеличивается по мере дальнейшего падения температуры. Это, по мнению авторов, должно наложить отпечаток на ход эволюции Вселенной.

В 1974 году голландский астрофизик Т. Хоофт и А. М. Поляков из Института теоретической физики АН СССР указали на то, что именно на рубеже Великого объединения при температуре 10 К, когда Вселенная еще была сильно сжатой, наряду с известными нам

частицами, должны интенсивно рождаться монополи, удивительные магнитные частицы, являющиеся как бы однополюсными магнитами или магнитными зарядами. Они рождаются парами — северный монополюс и южный монополюс. На возможность существования магнитных монополей еще в 1931 году указал гениальный физик П. А. Дирак, первым теоретически предсказавший существование в природе антиматерии. Теоретики подробно рассмотрели свойства таких монополей и установили, что масса монополя должна быть в 1016 раз больше массы протона. Несколько групп экспериментаторов пытались обнаружить эти экзотические частицы.

Результат экспериментов всегда был отрицательным, хотя чувствительность и надежность использованных приборов были весьма велики.

Монополи бросили вызов астрофизикам. Они обязаны были объяснить, почему, несмотря на предсказание Т. Хоофта и Полякова, магнитные монополи в наше время отсутствуют?

В том же 1974 году И. Ю. Кобзарев, Я. Б. Зельдович и А. Б. Окунь установили: исходя из свойств физического вакуума, следует ожидать, что Вселенная на ранней стадии ее эволюции может расчлениваться на отдельные области — домены. Они разделены между собой и эволюционировали независимо. Затем М. Б. Волошин, Кобзарев и Окунь высказали интересное предположение: в начале эволюции Вселенная прошла через необычное состояние — его назвали ложным вакуумом. Это не физический вакуум, уже известный науке. Но отдельные области ложного вакуума могут независимо одна от другой переходить в состояние обычного физического вакуума, порождая при этом независимые домены. Их-то и рассмотрели в только что упомянутой работе советские ученые.

Так, продвигаясь шаг за шагом к пониманию эволюции Вселенной, ученые наткнулись на новые трудности и загадки. Однако, считая, что эти трудности удастся преодолеть, астрофизики стремились развить модель Большого взрыва в сторону приближения к его таинственному началу.

В 1980 году вышла статья, в которой один из создателей теории электрослабого взаимодействия лауреат Нобелевской премии С. Вайнберг подвел итог попыткам приблизиться к пониманию начальной стадии Большого взрыва. Сценарий, с которым мы познакомились выше, начинался с момента, отстоящего на 0,01 с от начала.

Новые знания законов взаимодействия элементарных j частиц позволили ученым мысленно продвинуться еще ближе к началу, где температура и плотность были еще более высокими.

Ученые исходили из нового понимания принципиально: важного критерия, показывающего, какие частицы являются элементарными. Теперь они считали элементарными частицами семейство фотонов, семейство лептонов и антилептонов, семейство кварков и антикварков и семейство глюонов, удерживающих кварки внутри ядерных частиц.

Попробуем и мы, вооружившись этим современным критерием, проследить за продвижением ученых от момента, отстоящего на 0,01 с от начала, еще ближе к началу. Мы уже знаем, что, приступая к дальнейшей работе, ученые считали, что на рубеже 0,01 с при температуре порядка 10^{11} К вещество Вселенной состояло из протонов, нейтронов, электронов, нейтрино, их античастиц и огромного количества фотонов.

Эта точка зрения не претерпела изменений. Но на более раннем рубеже при температуре 10^{12} К, энергия, заключенная в этой раскаленной плазме, столь велика, что кварки не могут объединиться и образовать протоны, нейтроны или мезоны. Эти составные частицы теперь становятся виртуальными, то есть возникают на ничтожные мгновения и снова распадаются в раскаленной мешанине фотонов, лептонов, кварков и глюонов.

Еще ближе к началу Большого взрыва, при температурах вплоть до 10^{13} К, энергия столь велика, что становятся возможными виртуальные рождения чрезвычайно тяжелых частиц, родственных фотонам, — промежуточных бозонов, которые, как мы знаем, являются переносчиками слабого взаимодействия.

То, что было еще раньше, характеризуется много более высокими температурами и плотностями. Частицы находятся так близко одна от другой, что гравитационное взаимодействие сравнивается по силе с остальными и теперь все они представляют единое взаимодействие, единое поле.

В первоначальном сценарии предполагалось, что отсутствие антивещества во Вселенной связано с тем, что на рубеже одной сотой секунды случайно на один миллиард частиц и античастиц была одна лишняя частица. Считалось, что из этих «избыточных» частиц образовалось все, что мы видим вокруг. Остальные частицы и античастицы аннигилировали, превратившись в фотоны.

Со временем ученые пришли к выводу о том, что симметрия частиц и античастиц была нарушена уже раньше. Новые оценки гласили: в самые ранние времена на 10^8 — 10^{10} кварков и антикварков приходился один лишний кварк. И это сохранилось при последующей эволюции. Теория позволяет предположить и другой путь возникновения избытка частиц над античастицами. Возможно, что в начальный период, когда в раскаленной плотной массе вещества и энергии рождались и вновь распадались все известные нам частицы, количество частиц и античастиц было точно равно. Затем, в результате расширения Вселенной, температура упала настолько, что рождение тяжелых частиц и их античастиц стало невозможным. Но их исчезновение в результате попарной аннигиляции тяжелых частиц и античастиц продолжалось, не нарушая баланса между ними. На этот процесс накладывался конкурирующий процесс распада тяжелых частиц, происходящий под влиянием сил слабого взаимодействия. Теория показывает, что для некоторых тяжелых частиц такой распад идет с преимущественным рождением протонов и нейтронов. Так возникает новая возможность возникновения избытка обычного вещества: при распаде тяжелых частиц рождалось больше протонов и нейтронов, чем их античастиц. Поэтому при последующей аннигиляции протонов и нейтронов с их античастицами возник избыток протонов и нейтронов, из которых в ходе нуклеосинтеза возникли остальные химические элементы.

Не будем обсуждать доводы, служившие в семидесятые годы ученым основой для продвижения к началу эволюции Вселенной.

Одновременно с построением дополнительных первых глав сценария выявлялись трудности и противоречия, приведшие к радикальному пересмотру того, что было достигнуто.

Новые вопросы

Прежде чем идти дальше, расположим все кадры сценария, в том числе новые начальные кадры, в порядке их следования. В таком виде он получил название стандартного сценария.

Усовершенствованный стандартный сценарий, так же как его первоначальный вариант, не говорит ничего о том, как Вселенная пришла в исходное сверхгорячее и сверхплотное состояние.

Стандартный сценарий не претендует и на описание эволюции Вселенной в состоянии суперобъединения. Первое конкретное высказывание о предыстории Вселенной состоит в том, что при остывании до температуры 10^{29} К, сильное электромагнитное и слабое взаимодействия были объединены в единое поле.

Первый кадр фиксирует момент времени порядка 10^{-35} с от начала расширения, когда температура падает до критического значения 10^{28} К и происходит первое нарушение симметрии Великого объединения. С этого момента сильные взаимодействия отделяются от электрослабых, а лептоны от кварков.

Во второй переломный момент, через 10^{-10} с от начала расширения, при температуре порядка 10^{15} К происходит следующий переход: электромагнитные взаимодействия отделяются от слабых.

Дальнейшая эволюция Вселенной происходит так, как это отображают последующие

кадры сценария Большого взрыва, описанные выше.

Даже уточнения, введенные в стандартный сценарий эволюции горячей Вселенной, не позволили избавиться от целого ряда трудностей, выявившихся в ходе анализа этого сценария.

Прежде всего остался открытым вопрос о том, как Вселенная пришла в исходное сверхплотное, сверхгорячее состояние. Этот вопрос порожден самой теорией Фридмана. Ученые стремились узнать, что было до момента времени, с которого в теории Фридмана начат отсчет времени. Некоторые считают, что вопрос о том, что было до начала, не имеет физического смысла. Но такой подход кажется многим ученым не вполне удовлетворительным. Возможно, нужно привыкнуть к некорректности этого вопроса, как мы привыкли к недостижимости абсолютного нуля температуры, к принципу неопределенности в квантовой механике. Может быть, и пространство подвержено своеобразному квантованию и не может существовать размера или объема, меньше элементарного. Эти вопросы еще тревожат физиков, определяя дальнейшие задачи исследователей. Целью науки остаются поиски ответов на эти вопросы. Ответов, опирающихся на дальнейшее углубление в тайны Природы.

Остался и вопрос о первоначальной кривизне Вселенной. Мы помним, что наблюдения показывают чрезвычайную близость средней плотности материи в современной Вселенной к ее критическому значению, при котором Вселенная должна быть плоской, точнее, ее пространство должно соответствовать геометрии Евклида. Оценки показывают, что для существования современной Вселенной с ее наблюдаемым размером, равным 10^{28} см, и лежащей в узких пределах средней плотностью материи необходимо, чтобы в начальный момент средняя плотность материи отличалась от критической средней плотности меньше чем на 10^{-55} от ее величины. Эти же оценки подсказывают, что если бы в начальный момент средняя плотность материи отличалась всего на 10^{-55} в меньшую сторону, то современная средняя плотность материи во Вселенной была бы столь малой, что образование звезд, планет и появление людей, задающих вопросы природе, было бы невозможно.

Если же средняя плотность материи была бы на 10^{-55} больше, то Вселенная была бы замкнутой, а темп ее эволюции был бы очень быстрым, и ее расширение уже давно должно было бы перейти в сжатие, и Вселенная уже давно должна была сколлапсировать и превратиться в колоссальную черную дыру. При этом ускоренном темпе эволюции не хватило бы времени на возникновение современных звезд и на зарождение жизни.

О ее дальнейшей судьбе на основе имеющихся знаний нельзя сказать ничего определенного.

Стандартный сценарий не может объяснить причин изотропии реликтового излучения, того, что оно приходит со всех сторон одинаковым. Опыты показали, что если учтено влияние движения Земли, то реликтовое излучение одинаково во всей небесной сфере с погрешностью меньшей, чем одна десятитысячная. Трудность объяснения этого экспериментального факта состоит в том, что в период, непосредственно следующий за Большим взрывом, Вселенная, согласно стандартному сценарию, расширяется так быстро, что невозможно уловить причины ее начальной однородности. Но именно это необходимо для объяснения изотропии реликтового излучения.

Причиной, приводящей к этой трудности, является постулат о предельной роли скорости света, лежащей в основе Специальной теории относительности. Этот постулат, достоверность которого не вызывает сомнений, означает, что ни один физический процесс, ни один сигнал, несущий информацию, не может распространяться быстрее света, быстрее сигнала, переносимого светом. Но если считать источником сигнала сам Большой взрыв, то в каждый момент после него существует вполне определенное расстояние, на которое свет донесет сигнал о происшедшем Большом взрыве. Оно равно произведению скорости света на время, прошедшее от Большого взрыва. За этим расстоянием утвердилось наименование «горизонт событий» или просто «горизонт». Так как скорость света является предельной, то за горизонт событий нельзя передать никакого сигнала, из-за горизонта событий нельзя

получить никакой информации. К этому нам предстоит возвратиться позднее. Сейчас же обратим внимание на то, что между точками, удаленными на расстояние, превышающее радиус горизонта событий, не может существовать никакого физического взаимодействия. Между ними невозможны причинно-следственные связи.

Предельный характер скорости света приводит к заключению о том, что ни одно событие, лежащее за горизонтом, не может быть причиной или следствием события, происходящего в центре пространства, охваченного этим горизонтом. Вместе с тем конкретные математические расчеты, выполненные на основе стандартной космологической модели, приводят к парадоксальному результату. Расстояние между источниками реликтового излучения, находящимися в момент испускания этого излучения в противоположных направлениях на небесной сфере, в 90 раз превышало расстояние до существовавшего в тот момент горизонта.

Таким образом, причинная связь между этими источниками реликтового излучения отсутствовала, и трудно объяснить, каким образом эти источники пребывали в почти одинаковых условиях.

Физики называют эту загадку проблемой горизонта. Эту проблему можно ликвидировать, введя в качестве начального условия высокую степень первоначальной однородности Вселенной и предположив, что такая однородность сохраняется на первых стадиях Большого взрыва. Но при этом остается необоснованным и непонятным, почему возникли такие жесткие начальные условия. Проблема оказывается не решенной, а лишь перенесенной от уравнений, описывающих течение процесса, к начальным условиям, устанавливающим, с чего началось развитие этого процесса.

В стандартном сценарии имеется еще одна трудность, связанная с предыдущей. Для объяснения существования современных галактик, скоплений галактик и их сверхскоплений, наблюдаемых астрономами, необходимо, чтобы наряду с начальной, очень высокой однородностью ранняя Вселенная содержала бы определенные малые начальные неоднородности, такие, вокруг которых в ходе эволюции концентрировались огромные массы вещества, образующие иерархию галактик. Эти начальные неоднородности не могут самопроизвольно возникнуть в случае, если принята гипотеза однородных начальных условий. Значит, начальные условия нужно усложнить, совместив в них наличие мелких неоднородностей на фоне общей однородности «в среднем». Однако такие начальные условия с трудом согласуются с современными данными о свойствах очень плотной горячей плазмы. Представляется необходимым объяснить, как подобные начальные условия приводят Вселенную к современному виду, в каком она предстает перед астрономами в наши дни.

Существенной трудностью стандартного сценария является проблема средней плотности материи во Вселенной. С ней мы уже встречались при обсуждении первоначальной теории Фридмана. Современные оценки на основе наблюдений астрономов показывают, что отклонение средней плотности материи от критического значения, принятого за единицу, лежит в пределах от 0,1 до 2. Но вычисления, проведенные на основе стандартного сценария, показывают: для того чтобы в процессе расширения средняя плотность материи попала внутрь этих границ, она должна через секунду после начала расширения равняться единице с погрешностью менее чем 10^{-15} . Это, конечно, менее жесткое требование, чем погрешность 10^{-65} , с которой мы встречались в более раннем периоде расширения. Но стандартный сценарий не способен объяснить причину, приведшую к тому, что средняя плотность материи, вплоть до первой секунды расширения, была равна своему критическому значению с такой большой точностью.

Не может считаться окончательно решенным вопрос о современном преобладании вещества над антивеществом. Стандартный сценарий объясняет его ссылкой на малую флуктуацию. На случайное отклонение от равенства числа ядерных частиц — барионов и числа антибарионов в начале аннигиляции. Такого отклонения, что на миллиард антибарионов приходилось ровно миллиард и еще один лишний барион. Общее количество

барионов и антибарионов в то время было столь велико, что этого ничтожного преимущества достаточно, чтобы после аннигиляции всех пар барионов и антибарионов осталось ровно столько «избыточных» барионов, сколько их существует в современной Вселенной. А общее число барионов в видимой части Вселенной сейчас по оценкам составляет 10^{78} . Перенос этой проблемы на более раннюю стадию эволюции, когда барионы и антибарионы рождались из кварков и антикварков, не решает вопроса из-за трудности проведения точных вычислений процессов рождения и аннигиляции тяжелых барионов.

К этим проблемам в конце семидесятых годов прибавились новые, возникшие при подобном анализе конкретного применения теории Великого объединения к проблеме эволюции Вселенной. Несмотря на то что теория Великого объединения до сих пор не может считаться окончательно завершенной, она уже позволяет проводить анализ процессов микромира и получать много результатов, подтверждаемых точными опытами. Вместе с тем именно теория эволюции Вселенной оказалась лабораторией, способной отвергать различные варианты Великого объединения и поддерживать другие, несмотря на то что основная область применения теории Великого объединения не космос, а микромир.

Еще одна трудность возникает при попытках связать между собой проблему горизонта с тем переломным моментом в развитии Вселенной, который происходил при температуре порядка 10^{28} К и привел к разрушению симметрии Великого объединения.

Наша современная Вселенная, точнее, ее видимая часть, ограниченная горизонтом, имеет размеры 10^{28} см.

Наблюдения показывают, что во всем этом огромном пространстве справедливы одни и те же физические законы. Самые удаленные однопородные объекты, доступные крупнейшим телескопам и радиотелескопам, не различаются между собой. Невозможно отказаться от мысли о том, что они прошли общий путь развития, начиная с самых ранних этапов эволюции Вселенной. Но такая общность возможна, только если вся Вселенная первоначально находилась внутри единой области, ограниченной горизонтом событий.

Первый отсчет времени, соответствующий нарушению суперобъединения, соответствует, как мы знаем, 10^{-35} с после начала Большого взрыва. В этот момент горизонт событий ограничивал область размером около 10^{-25} см, *то есть в 10^{12} раз меньшей диаметра атомного ядра.*

В исходной Вселенной должно было быть много таких затравочных областей. Выше уже говорилось, что они не могут быть причинно связанными между собой и поэтому развивались совершенно независимо.

Во время первого переломного момента, завершающего существование Великого объединения, несвязанные области — домены — должны были оказаться разделенными между собой границами, на которых возникает большая избыточная плотность материи. Более того, во всех вариантах теории Великого объединения, как установили в 1974 году Хоофт и Поляков, во время этого перехода при температуре 10^{28} К должно было рождаться большое количество магнитных монополей.

Расчеты показали: и стенки доменов, и монополи чрезвычайно устойчивы. Количество их, возникшее на рубеже распада Великого объединения, столь велико, что их совокупная масса значительно превосходит остальную массу Вселенной, — это должно было ускорить ее эволюцию. Ускорить настолько, что охлаждение реликтового излучения до 3 К должно было бы совершиться не за 10^{10} лет, а всего за $3 \cdot 10^4$ лет после начала расширения. Все предсказания теории Большого взрыва, подтвержденные опытом, показывают, что возникновение жизни за такой промежуток времени невозможно. Против стандартного сценария эволюции Вселенной свидетельствует и то, что ни одна из многочисленных попыток обнаружить существование монополей, не привела к успеху.

Все эти трудности и еще несколько менее существенных явно указывают, что применение теории Великого объединения к уточнению теории Большого взрыва нуждается в тщательном анализе.

Первые попытки

Первую, четко направленную попытку преодоления трудностей стандартного сценария сделал в 1979 году молодой советский ученый А. А. Старобинский. Его целью было понять: как избежать заложенного в решении Фридмана сакраментального момента начального расширения Вселенной из нулевого объема? Он исходил из того, что структура пространства Вселенной, расширяющейся в соответствии с решением Фридмана, даже при очень большой плотности энергии вполне удовлетворяет уравнениям Эйнштейна.

Но для описания самого первого этапа расширения необходимо учесть некоторые простейшие квантовые поправки к этим уравнениям.

Ведь сам Эйнштейн считал, что ряд обстоятельств требует объединения теории относительности с квантовой теорией. Без этого невозможно, например, понять факт устойчивости атомов. Устойчивость атомов, их длительное существование, заставили Бора признать, что теория Максвелла теряет силу в атомных масштабах. Иначе электроны, входящие в атом, должны излучать электромагнитные волны и, теряя таким образом энергию, упасть на ядро атома. Эйнштейн указывал на то, что электроны, входящие в атом, в соответствии с теорией относительности должны излучать гравитационные волны. А это тоже связано с потерей энергии и гибелью атома. Но атомы не гибнут. Значит, какие-то квантовые запреты препятствуют электронам, находящимся в атомах, излучать гравитационные волны.

Создание квантовой теории гравитации оказалось чрезвычайно трудной задачей. Она не решена до сих пор. Однако первые приближения к ее решению уже реализованы.

Старобинский начал свою статью так: «В настоящее время теория квантовых эффектов в сильных гравитационных полях является уже достаточно развитой, чтобы можно было серьезно поставить вопрос о том, каково было состояние Вселенной до начала ее классического расширения по фридмановскому закону... иными словами — что было до „Большого взрыва“».

Здесь необходимо сделать пояснение: слова до Большого взрыва нужно понимать не буквально, не в смысле «до начала расширения». Старобинский хотел придвинуться к «началу» ближе того рубежа, на котором остановились его предшественники, создавшие стандартные сценарии Большого взрыва.

Вспомним, что непреодолимой и преградой их продвижению была именно необходимость учета квантовых поправок к теории Эйнштейна — Фридмана.

Новым в подходе Старобинского была и вторая цель. Он стремился выяснить: сохранились ли до наших дней следы процессов, протекавших на самых ранних этапах эволюции Вселенной? Он хотел получать из своей новой теории выводы, доступные проверке. Мы видели, что до его работы теория Большого взрыва привела лишь к двум результатам, пригодным для проверки: относительное содержание гелия и водорода, а также температура реликтового излучения. Старобинский уже в 1976 году сделал первую попытку расширить сценарии Большого взрыва, продвинуться ближе к начальным кадрам, изображающим неведомые ранние этапы эволюции Вселенной. Но вычисленная им тогда величина (амплитуда оставшихся с того времени гравитационных волн) была много ниже чувствительности аппаратуры, имевшейся у физиков.

Теперь Старобинский пошел другим путем. Он построил модель Вселенной, считая, что она вначале находилась в квантовом состоянии внутри очень малого объема. Столь малого, что его кривизна приближалась к планковскому масштабу, с которым мы познакомились выше. А затем начала расширяться. Учет квантовых поправок к теории гравитации Эйнштейна показал, что расширение Вселенной не сразу подчинилось классическому фридмановскому закону расширения.

До начала фридмановского расширения Вселенная расширялась ускоренно, так, как это вскоре после опубликования Общей теории относительности предположил В. де Ситтер.

Работы де Ситтера в течение долгого времени оставались вне основного русла развития

науки, несмотря на то что они были высоко оценены Эйнштейном, который еще в 1918 году писал, что «мы обязаны (де Ситтеру. — Ц. Р.) глубокими исследованиями в области Общей теории относительности...».

Де Ситтер нашел ряд решений уравнений Общей теории относительности, отличных от первоначальных решений Эйнштейна и Фридмана. Вспомним, что первое из них описывало стационарную Вселенную, а второе — Вселенную, скорость расширения которой с самого начала уменьшается под влиянием гравитационных сил.

Одно из решений, полученных де Ситтером, описывало ускоренное расширение Вселенной. Ускорение быстро увеличивает скорость. Она должна достичь и даже превзойти скорость света, но это противоречит самой теории относительности... Де Ситтер пришел к этому странному решению формальным путем, не ставя вопрос о том, чем вызвано ускоренное расширение Вселенной, когда и почему ускорение прекратится (ведь ускорение должно рано или поздно прекратиться, чтобы скорость расширения не превзошла скорости света). Именно поэтому работа де Ситтера не была продолжена.

Учет квантовых эффектов привел к успеху теории Старобинского. Оказалось, что квантовые поправки непосредственно приводят к быстрому ускорению расширения Вселенной в начале ее эволюции. По мере уменьшения плотности материи и энергии вследствие расширения Вселенной величина квантовых поправок постепенно уменьшается, а вместе с ними постепенно исчезает причина, приводящая к возрастанию скорости расширения. Старобинский назвал стадию ускоренного расширения Вселенной де ситтеровской стадией.

Но, в отличие от первоначальной гипотезы де Ситтера, решение Старобинского показало, почему и как постепенное уменьшение плотности энергии в расширяющейся Вселенной приводит к переходу от де ситтеровской стадии к классической фридмановской стадии, при которой гравитационные силы постепенно уменьшают скорость расширения Вселенной, а квантовые поправки становятся исчезающе малыми.

Старобинский отмечает, что в шестидесятых и семидесятых годах уже были попытки возродить идеи де Ситтера. Однако они исходили из необоснованных предположений и не приводили к результатам, допускающим проверку опытом. Из теории Старобинского следует, что при переходе от ускоренного расширения к замедляющемуся происходит интенсивное рождение гравитонов. Они рождаются в таком количестве, что представляется вполне реальным обнаружение реликтовых гравитационных волн, родившихся много раньше, чем реликтовое электромагнитное излучение. Для этого, конечно, следует увеличить чувствительность детекторов гравитационных волн, применяемых сейчас и разработанных с целью обнаружения гравитационных волн, приходящих из космоса.

Очень важно, что Старобинский ориентировал физиков-экспериментаторов и астрофизиков на подготовку опыта, способного подтвердить или опровергнуть его теорию. Так возникла третья возможность экспериментальной проверки теории Большого взрыва, проверки того, какой была Вселенная во времена, когда ее возраст не достиг 10-35 секунд.

Таким образом, Старобинский показал, что учет квантовых поправок действительно освобождает теорию от необоснованного представления о том, что эволюция Вселенной начинается из нулевого объема под действием неведомых науке сил, которые рождают ее в состоянии быстрого взрывоопасного расширения из нулевого объема. Теперь стало понятным, что Вселенная могла первоначально иметь конечный (не нулевой) объем. Она была выведена из него вследствие присущих материи квантовых свойств, порождавших, в условиях крайне высокой плотности, силы, вызывающие ускоренное расширение Вселенной.

Чем же подход Старобинского отличается от взгляда де Ситтера и от стандартного сценария эволюции Вселенной? Де Ситтер считал Вселенную изначально пустой. Стандартный сценарий исходит из раскаленной сверхплотной мешанины элементарных частиц.

Учет квантовых поправок к решению уравнений Эйнштейна показал, что Вселенная была первоначально заполнена поляризованным вакуумом. Это новый для нас тип вакуума.

Его эффективное отрицательное давление вызывало ускоренное расширение Вселенной. В ходе этого расширения поляризованный вакуум распадался, порождая элементарные частицы, обладающие огромными энергиями. Плотность и температура элементарных частиц постепенно увеличивалась. По мере распада поляризованного вакуума его давление уменьшалось, поэтому постепенно прекращалось и увеличение скорости расширения Вселенной. К моменту, когда поляризованный вакуум полностью распался, эволюция Вселенной перешла к этапам, описываемым кадрами стандартного сценария: Вселенная, состоящая из раскаленной мешанины элементарных частиц, расширяется «по Фридману», причем скорость расширения медленно уменьшается под действием силы гравитации.

Исходный вариант модели Старобинского позволял устранить большинство из перечисленных выше трудностей стандартной модели. Однако некоторые из них оставались. Например, уравнения говорили, что вторичное разогревание исходной горячей Вселенной Фридмана превышало 10^4 К настолько, что при последующем охлаждении, когда разрушалось Великое объединение, должны были в больших количествах рождаться магнитные монополи. Однако это не соответствует действительности. Вычисления, проведенные в рамках этой модели, показали, что неоднородности плотности, возникающие при переходе от первого этапа быстрого расширения к горячей модели Фридмана, тоже получаются слишком большими.

Трудности, возникавшие в первом варианте модели Старобинского, устранены в ходе ее последующего уточнения. Это потребовало введения в уравнения дополнительного члена. Такого, что отношение кривизны пространства к исходной массе поля входит в него не в первой степени, а в квадрате. А это позволяет описать процесс первоначального быстрого расширения Вселенной и ее последующего разогрева так, что разогревание Вселенной к началу фридмановской стадии превосходит 10^{27} К, то есть не достигает температуры, при которой рождаются магнитные монополи и стенки доменов. Это снимает главную из трудностей первого варианта модели Старобинского.

Заслугой Старобинского и достоинством его модели является и то, что впервые в описание эволюции Вселенной корректно введены квантовые свойства материи, а также гравитационные волны и их кванты-гравитоны, рождающиеся на ранних стадиях этой эволюции. Старобинский оценил, могут ли реликтовые гравитационные волны, оставшиеся от первых мгновений истории Вселенной, быть обнаружены в наши дни. Оценка оказалась не намного ниже современных экспериментальных возможностей. Это стимулирует ученых к совершенствованию приборов, при помощи которых они пытаются, пока безуспешно, обнаружить гравитационные волны, порождаемые двойными звездами, взрывами сверхновых и другими явлениями.

Модель Старобинского считается одним из перспективных вариантов теории ранних стадий эволюции Вселенной. Он сам и другие ученые продолжают изучать роль квантовых процессов в теории Большого взрыва. Возможно, окончательная теория возникнет как синтез модели Старобинского и модели раздувающейся Вселенной, к которой мы теперь переходим.

Впечатляющую попытку решить интересующую нас проблему сделал в 1980 году А. Г. Гус. Исходя из иных, чем Старобинский, соображений, он тоже пришел к выводу о том, что исходная стадия расширения происходила со скоростью, намного превосходящей ту, о которой говорили в 1978 году. И что особенно важно, на первом этапе расширения скорость не убывала, как в стандартной модели, а чрезвычайно быстро возрастала. Гус назвал эту часть процесса расширения Вселенной инфляционной фазой. В буквальном переводе с английского слово «инфляция» означает «раздувание». Однако у него есть и другой смысл — ускоряющееся обесценивание денег и ускоряющийся выпуск новых, которые немедленно начинают обесцениваться.

Теперь инфляционную фазу называют раздуванием, имея в виду аналогию с раздувающимся резиновым шариком и стремясь подчеркнуть отличие этой фазы от замедляющегося расширения Вселенной по фридмановскому закону.

Эта аналогия с шариком выступает особенно явственно при расчете кривизны Вселенной.

Все теории, включающие период такого ускоряющегося роста размеров Вселенной, обычно называют сценарием раздувающейся Вселенной. При этом имеют в виду, что эволюция Вселенной содержит стадию де ситтеровского расширения.

Существенно новым у Гуса, по сравнению с моделью Старобинского, которая тоже включает ускоряющийся рост первоначального размера Вселенной, было следующее: он предположил, что быстрое расширение Вселенной продолжалось и после того, как ее температура опустилась ниже критической температуры 1029 К. Но, несмотря на это, изменение свойств Вселенной, связанное с разрушением Великого объединения, не началось.

Гус уподобил этот переход фазовым переходам, хорошо известным в физике.

Понижение температуры вещества ниже температуры фазового перехода наблюдается и в обычных условиях. Примером фазового перехода является переход воды в лед при температуре 0 °С. Температуру, при которой происходит превращение жидкой воды в твердый лед, называют температурой фазового перехода. Но воду можно охладить значительно ниже температуры замерзания, ниже температуры фазового перехода без того, чтобы она превратилась в лед. Если вода хорошо очищена от пылинок и пузырьков газа, а сосуд с охлаждаемой водой защищен от толчков и вибраций, то вода остается жидкой и при отрицательных температурах, вплоть до —20 °С. Если в этом переохлажденном состоянии в силу случайной причины (попадание пылинки, толчок) начинается кристаллизация, то она происходит очень быстро, причем высвобождается большое количество тепла. Это как раз то тепло, которое необходимо ввести в лед для его плавления, скрытое тепло плавления.

Следует обратить внимание на то, что лед, образующийся из воды, замерзающей при температуре — 20 °С, будет иметь температуру, превышающую — 20 °С, ибо выделяющаяся скрытая теплота нагреет образующийся лед. Для понимания преимуществ сценария раздувающейся Вселенной очень важно, что скрытая теплота, выделяющаяся при замерзании переохлажденной воды, не может нагреть образующийся лед до температуры фазового перехода (до 0 °С). При бурном течении фазового перехода вода быстро превратится в лед, но температура получившегося льда останется ниже 0 °С. Аналогичное переохлажденное состояние и фазовый переход при температуре меньшей, чем критическая, возникает в начале сценария раздувающейся Вселенной.

Теперь нам ясно, как сценарий раздувающейся Вселенной справляется с проблемой рождения монополей и стенок доменов и с проблемой кривизны пространства. Фазовый переход, следующий из теорий Великого объединения, происходит очень медленно по сравнению с ускоряющимся расширением Вселенной. Поэтому монополи, если они рождаются в условиях фазового перехода из переохлажденного состояния, окажутся вследствие расширения далеко за пределами той области раздувающегося пространства, которая породила нашу видимую Вселенную. При таком раздувании пространственная кривизна этой области пространства быстро уменьшается, как уменьшается кривизна поверхности раздуваемого резинового шарика. Уравнения, описывающие процесс раздувания, показывают, что, когда он закончится, геометрические свойства Вселенной с большой точностью удовлетворят геометрию Евклида. Это одно из важнейших предсказаний сценария, ибо оно допускает проверку опытом. К сожалению, выполнить такой опыт чрезвычайно сложно: задача сводится к значительному увеличению точности определения средней плотности массы во Вселенной. Сценарий предсказывает, что эта величина должна быть очень близка к критическому значению средней плотности, тому значению, при котором решение Фридмана оказывается лежащим на границе между неограниченным расширением и периодической сменой расширения и сжатия Вселенной.

Первоначальный сценарий Гуса содержит удивительный результат, относящийся к свойствам переохлажденного состояния Вселенной. Состояние, из которого началось ускоряющееся расширение Вселенной, никогда не наблюдалось, но свойства материи в этом состоянии однозначно предсказывает квантовая теория поля. Это состояние и называют

ложным вакуумом. При переходе к этому состоянию температура, а значит, и тепловая составляющая плотности энергии, какой бы она ни была ранее, быстро убывает. А энергия в соответствии с законом сохранения энергии переходит в энергию ложного вакуума.

Модельная шляпа

Но если Вселенная в начале своей эволюции находилась в состоянии ложного вакуума, то ее дальнейшую судьбу — начальный этап расширения — легко представить при помощи простой модели. Представьте себе круглую мужскую шляпу. Верх ее вдавлен и образует подобие кратера вулкана, окруженного валом. Поля шляпы загнуты вверх. Они словно кольцевой ров вокруг подножия вулкана. Запомните эту шляпу — она нам пригодится.

А сейчас мы познакомимся с ученым по фамилии Хиггс и с хиггсовскими полями.

Хиггсовские поля играют важную роль в эволюции Вселенной. Р. У. Хиггс впервые ввел их в аппарат теоретической физики, чтобы разобраться в существовании Великого объединения. Теперь физики твердо усвоили: если хиггсовские поля равны нулю, то при очень высокой температуре три основных взаимодействия (сильное, слабое и электромагнитное), играющие роль в процессах микромира, объединяются между собой. Они становятся неразличимыми и действуют как одна сила, определяющая все процессы микромира. Это и есть знакомое нам Великое объединение. При этом материя, а значит, вещество и энергия находятся в наиболее симметричном состоянии. Если хотя бы одно из хиггсовских полей отличается от нуля, то симметрия нарушается. Причем процесс нарушения симметрии является особым фазовым переходом, подобным переходу воды в лед.

И этот фазовый переход происходит тем быстрее, чем сильнее отличаются от нуля хиггсовские поля. Связь хиггсовских полей со скоростью фазового перехода играет основную роль в сценарии раздувающейся Вселенной. Теперь вспомним нашу шляпу и представим, что это модель Вселенной.

Хиггсово поле равно нулю на оси шляпы — в центре впадины, в ее средней части. И возрастает при удалении от оси. Область ложного вакуума сосредоточена на дне кратера. Ров, окружающий «вулкан», соответствует зоне истинного вакуума. Главная часть энергии ложного вакуума сосредоточена в этой модели у оси кратера. Она много больше плотности энергии в состоянии истинного вакуума, занимающего нижнюю часть кольцевого рва, и в 1059 раз превышает плотность энергии внутри атомного ядра. Плотность энергии должна расти при продвижении вверх по стенкам «вулкана». Она максимальна там, где внутренние стенки кратера переходят во внешние, спускающиеся к кольцевому рву, окружающему кратер.

Если бы в начальной стадии рождения Вселенной действовали законы классической физики, то Вселенная осталась бы навсегда в состоянии ложного вакуума — в центре кратера нашей модели. Ведь в этом состоянии в начальный момент сосредоточена вся энергия Вселенной и не существует дополнительной энергии, которая могла бы вывести Вселенную из этого состояния, поднять ее на вал, окружающий кратер, с тем чтобы после этого началась ее дальнейшая эволюция.

Но при огромных плотностях энергии, о которых только что говорилось, законы классической физики уступают место законам квантовой физики. А эти законы допускают самопроизвольный переход энергии за пределы энергетического барьера (вала кратера в нашей модели). Она уходит словно сквозь туннель. В результате такого туннельного перехода небольшие области ложного вакуума оказываются за пределами барьера на наружной поверхности модели.

Процесс туннелирования не следует представлять себе как образование реального туннеля, сквозь который затем начинает протекать содержимое кратера, как вода через отверстие в стенке бака. Процесс туннелирования — это особый квантовый процесс, при котором небольшая порция содержимого кратера исчезает внутри его и возникает вне его. Аналогично происходит, например, радиоактивный распад ядер атомов.

В сценарии Гуса ложный вакуум исчезает внутри кратера малыми порциями. Одновременно эта часть ложного вакуума возникает на внешней стенке вала кратера, возникает за барьером. Эту часть можно представить себе пузырьком ложного вакуума. Но здесь, за барьером, хиггсовское поле существенно отлично от нуля. Поэтому симметрия внутри пузырька оказывается сильно нарушенной. Впрочем, это нарушение возникало и слабо росло еще внутри кратера, когда порция ложного вакуума удалялась от оси кратера к его внутренней стенке, перед тем как пройти сквозь барьер и образовать вне его пузырек.

Родившийся вне кратера пузырек ложного вакуума начинает быстро, со все ускоряющейся скоростью расти, раздуваться, одновременно превращаясь в истинный вакуум так, что плотность энергии в нем быстро уменьшается. На нашей модели это изображается быстрым скатыванием раздувающегося пузырька по внешней поверхности шляпы в кольцевой ров, образованный полями шляпы.

Дно этого рва соответствует истинному вакууму, в который обратится весь пузырек ложного вакуума в конце этого процесса. Объем пузырька при этом колоссально возрастает. Во время раздувания пузырька происходит фазовый переход из симметричного состояния в несимметричное, разрушается Великое объединение.

Расчеты показывают, что темп расширения пузырька увеличивается так быстро, что его диаметр удваивается каждые 10-34 с. Именно это имеют в виду, говоря об инфляционной фазе или раздувании Вселенной. Согласно этой модели раздувание продолжалось всего 10-32 с, но диаметр Вселенной, рождающейся из такого пузырька, за это ничтожное время увеличился более чем в 1050 раз. К концу этого расширения окончательно устанавливается фаза с нарушенной симметрией. В течение фазового перехода, как и при обычном фазовом переходе, колоссальная плотность энергии ложного вакуума выделялась в форме скрытой теплоты перехода, что сопровождалось рождением огромного числа частиц, в которых сосредоточилась выделившаяся энергия. Эти частицы обладали очень высокой температурой и находились в состоянии термодинамического равновесия между собой и с полем, заполняющим пузырек.

В сценарии Гуса, как и в сценарии Старобинского, снимается ряд трудностей стандартной модели. В процессе быстрого и сильного раздувания пространственная структура Вселенной становится практически плоской. А так как Вселенная рождается из маленького пузырька, помещающегося в пределах горизонта событий, то после его раздувания до современных размеров не возникает сомнения в существовании причинно-следственных связей, характеризуемых однородностью реликтового излучения. Сценарий Гуса объясняет отсутствие или крайнюю редкость магнитных монополей: если они и рождаются, то в результате раздувания они теперь окажутся в недостижимом удалении от нас. После подробного анализа Гус пришел к выводу, что его сценарий не только устраняет ряд дефектов стандартного сценария, но и приводит к новым трудностям. Например, вся энергия ложного вакуума, первоначально заполнявшего пузырек, оказывается сосредоточенной в его стенках. А стенки раздуваются со скоростью, близкой к скорости света. Из-за столкновений стенок отдельных раздувающихся пузырьков Вселенная разогревается. А это должно привести к сильной неоднородности Вселенной и к образованию магнитных монополей внутри ее наблюдаемой части, что противоречит результатам астрономических наблюдений.

Возможность преодоления основных трудностей стандартной модели расширения Вселенной привлекла к сценарию Гуса многих физиков. Они искали пути преодоления новых трудностей, возникающих в этом сценарии. К 1983 году в статье Гуса и Э. Вайнберга был подведен итог этих попыток. Итог сводился к тому, что дефекты сценария Гуса неустранимы.

В октябре 1981 года А. Д. Линде и независимо в январе 1982 года А. Альбрехт и Р. Стейнхард опубликовали результаты своих исследований, в которых сценарий раздувающейся Вселенной изменен так, что в нем не возникает трудностей, погубивших сценарий Гуса.

Главное различие достигнуто в результате более точного описания первых этапов эволюции. Суть этого различия может быть пояснена при помощи видоизменения «шляпы» в рассмотренной нами модели. В первой модели Гуса середина шляпы была сильно вогнута и ее форма напоминала кратер вулкана. В новом сценарии вершина шляпы не вогнута, а имеет в середине почти плоскую, очень слабо выпуклую область. При этом отсутствует барьер, разделяющий ложный вакуум, лежащий на вершине, и истинный вакуум, который занимает кольцеобразное углубление полей шляпы.

При таком видоизменении ложный вакуум превращается в истинный вакуум не путем туннельного перехода сквозь кольцевой барьер, а просто скатываясь вниз с вершины. Но это скатывание происходит медленно. Особенно медленно в самом начале скатывания — перехода из симметричного состояния Великого объединения в состояние, где сильные взаимодействия отделяются от электрослабых.

Первоначально большая плотность ложного вакуума порождает огромное отрицательное давление, приводящее к ускоренному расширению Вселенной. Ее размеры и в этом случае тоже удваивались за ничтожно короткие интервалы времени, через каждые 10^{-34} с.

По мере того как Вселенная переходила к все более крутым местам шляпы, ложный вакуум все быстрее превращался в истинный вакуум. Вследствие этого плотность ложного вакуума и величина его отрицательного давления уменьшались. Соответственно уменьшался темп расширения Вселенной. Расчет показал, что за время ускоренного расширения (раздувания или инфляционного расширения) размеры Вселенной увеличились в те же 10^{50} раз, как и в первом варианте.

Мы познакомились сейчас лишь с исходной идеей нового сценария эволюции раздувающейся Вселенной. Новый сценарий учитывает то, что ложный вакуум не скатывается с вершины как единое целое. Под влиянием флуктуации первичная Вселенная, находящаяся в состоянии ложного вакуума, распадается на части, которые, расходясь друг от друга независимо по разным путям, скатываются с плоской вершины к состоянию истинного вакуума. «Независимо» означает, что отдельные части при этом никак не взаимодействуют одна с другой. Это связано с известным нам горизонтом событий. Вспомним, что в то время горизонт событий был чрезвычайно мал — около 10^{-24} см (для сравнения: размер атомного ядра равен 10^{-13} см).

Каждая порция ложного вакуума, каждый домен независимо от других проходит через описанную выше стадию быстрого расширения, скатываясь в нашей модели своим путем от вершины в нижний ров. Каждая из них расширится так, что в конце быстрого расширения любой из них приобретет размер 10^{26} см. В этот момент наша видимая Вселенная, размеры которой сейчас составляют 10^{28} см, имела размеры всего в 10 см и располагалась глубоко в недрах одного из доменов.

В ходе такого быстрого расширения распад ложного вакуума приводит к рождению множества элементарных частиц, совокупность которых нагрета до температуры примерно 10^{26} К. Эта температура ниже температуры Великого объединения, и рождение таинственных магнитных монополей уже невозможно или, по крайней мере, весьма маловероятно. Если они будут появляться в стадии раздувания, то дальнейшее расширение унесет их вместе со стенками доменов далеко за границы наблюдаемой Вселенной. Это произойдет на следующем этапе, когда эволюция Вселенной происходит в соответствии с известным нам стандартным сценарием. Вселенная расширяется еще в 10^{27} раз, после чего шарик диаметром в 10 см приобретет современный размер наблюдаемой Вселенной, а стенки домена и монополи отодвинутся в недостижимую даль.

В таком виде сценарий раздувающейся Вселенной устраняет все недостатки ранних этапов стандартного сценария, сохраняя в силе его результаты, подтвержденные опытом (относительная концентрация гелия и водорода, а также температура реликтового излучения).

Но теоретики все еще недовольны. Их не устраивает, что процесс медленного

скатывания возможен, только если начальные характеристики первичной Вселенной перед началом скатывания заключены в узких пределах. Подобный перенос нерешенных вопросов к начальным условиям воспринимается физиками как ссылка на бога и должен быть устранен. Ниже мы увидим, что это им удалось.

Из глубин микромира к Вселенной

Для того чтобы приблизиться еще на один шаг к началу начал, необходимо новое продвижение в мир элементарных частиц. Теория Великого объединения не может служить руководством в мире температур, существенно превышающих 1028 К.

Следующий рубеж, отстоящий от начала менее чем на 10^{-34} с, характеризуется колоссальной температурой в 1032 К. При этой температуре плотность ложного вакуума достигала 1074 грамма на кубический сантиметр, а плотность частиц и античастиц, постоянно рождающихся и исчезающих в этом адском пекле, была еще большей и, возможно, достигала 1094 г/см.

В этих условиях сила гравитации, которая сейчас является самой слабой из сил взаимодействия, объединяется с остальными в одну универсальную силу. Ученые называют такое состояние суперсимметричным и иногда говорят о нем как о суперобъединении.

Вспомним, что ложный вакуум, в отличие от всей остальной материи и энергии, обладает внутренним давлением, что приводит к гравитационному отталкиванию. Но в самом начале, когда плотность горячей обычной материи больше плотности ложного вакуума, силы тяготения, порождаемые материей, перевешивали силы отталкивания, создаваемые ложным вакуумом. Поэтому вплоть до момента, отстоящего от начала на 10^{-34} с, Вселенная расширялась по обычным фридмановским законам.

В ходе такого расширения Вселенной плотность материи уменьшалась, а плотность ложного вакуума оставалась неизменной. Эпоха первоначального расширения закончилась через 10^{-34} с после условного фридмановского начала. В этот момент плотность материи сравнялась с плотностью ложного вакуума и продолжала убывать все быстрее. Вместе с плотностью материи убывают и силы тяготения, которые уже не могут противостоять отрицательному тяготению ложного вакуума. Это постоянно действующее внутреннее давление заставляет Вселенную расширяться все быстрее. За ничтожное время, от 10^{-34} с до 10^{-32} с, все размеры Вселенной увеличились в 1050 раз. При этом температура и плотность обычной материи стремительно уменьшаются и Вселенная становится переохлажденной, практически лишенной обычной материи и наполненной лишь ложным вакуумом. Стремительное охлаждение продолжается до тех пор, когда ложный вакуум теряет устойчивость. Ложный вакуум начинает превращаться в обычную материю, температура которой быстро увеличивается примерно до 1023 К. Это много ниже температуры 1028 К, при которой нарушается Великое объединение и рождаются магнитные монополи. Поэтому они не рождаются, что соответствует опыту, не обнаруживающему их, несмотря на большую чувствительность приборов.

Углубленные исследования начального состояния Вселенной опубликованные советскими учеными в 1985 году, привели к синтезу сценария Старобинского, исходящего из учета квантовых свойств сверхплотного гравитационного поля (учет квантовых эффектов необходим при плотностях материи, соответствующих суперобъединению всех четырех фундаментальных взаимодействий в единое суперсимметричное поле) и нового сценария раздувающейся Вселенной, предложенного Линде.

При этом тоже оказывается, что современная Вселенная — огромная область с радиусом 1028 см, на котором лежит наш современный горизонт событий, — является лишь малой частицей того, что возникло из одного домена ложного вакуума, размер которого в наши дни намного больше горизонта событий и может достигать фантастически больших размеров $10^{10} 5$ см — (Эта запись означает: десять в стотысячной степени.)

Ученые теперь вынуждены считать эту огромную область мини-вселенной, допуская,

что множество других мини-вселенных рождаются из других пузырьков ложного вакуума. Теперь мы должны считать Вселенной весь конгломерат этих мини-вселенных, в одной из которых мы живем.

Необходимо признать, что Вселенная, о которой шла речь выше, в действительности не охватывает всей материи и всего пространства. Мы будем по-прежнему называть Вселенной ту область пространства, ту материю, которую можно наблюдать: эта область лежит внутри сегодняшнего горизонта событий, и ее размеры — около 10^{28} см.

Ученые, стремящиеся к краткости, поступают так же — это удобнее, чем применять название «мини-вселенная». Термин, предназначенный для определения всей совокупности мини-вселенных, еще не установлен. Может быть, удобно называть мини-вселенные просто вселенными (с маленькой буквы), подобно тому как мы выделяем нашу Галактику от множества других галактик.

Забегая вперед, заметим, что невозможно обнаружить вселенные, лежащие за пределами горизонта событий. Но это не ограничивает человеческое познание, познавательную силу науки. Ученые считают, что законы природы, действующие в нашей Вселенной, справедливы и за ее пределами. Это позволяет теории проникать дальше, чем наблюдательной астрономии. *Человеческая мысль не ограничена даже горизонтом событий*.

Следует обратить внимание на преемственность результатов, получаемых на каждом этапе развития науки. Все совпадающее с опытом сохраняется, все противоречащее опыту отбрасывается.

Ученые теперь думают о том, что происходило при временах меньших, чем 10^{-45} с. Они считают, что тогда распадалось на кванты само время и пространство. Как это происходило и сохранились ли до наших дней какие-либо реликты — остатки этой эпохи, — можно только гадать.

Однако знания, уже полученные учеными, приводят к выводу о том, что теория справилась с главной трудностью познания прошлого. В эволюции Вселенной не было состояния, когда вся она была сжата в бесконечно малом объеме, когда плотность и температура должны были быть бесконечно большими.

Новые знания устранили и трудность, вызванную необходимостью жестко задавать начальные условия. Огромный масштаб ускоренного расширения не требует точных знаний того, что было до начала расширения. Эволюция Вселенной не зависит от того, началось ли расширение с размера 10^{-24} см или с еще меньшего размера. *Но можно с уверенностью сказать, что на этом рубеже она находилась в чрезвычайно плотном и горячем состоянии.*

Ученым удалось понять состояние Вселенной до момента, отстоящего всего на 10^{-34} с от условного фридмановского начала, проследить за ее переходом от этапа, начавшегося в момент 10^{-34} с, вплоть до момента 10^{-3} с, когда Вселенная вступила в зону стандартного сценария. Его достоверность подтверждена результатами наблюдений. Один из рубежей определил относительное содержание гелия 25–30 % и водорода 75–70 % с ничтожным содержанием остальных химических элементов; второй — определил температуру реликтового излучения, составляющую 2,7 К.

Мы подошли вслед за учеными вплотную к началу начал. Теперь следует посмотреть, как развитие науки сказалось на наших знаниях о современной Вселенной, ее недалеком прошлом и вероятном будущем.

К нашему времени

Оглянемся назад. Мы проследили за эволюцией Вселенной от момента, отстоящего на 10^{-34} с от начала эволюции, если за стартовый момент принять условное начало фридмановского решения уравнений Эйнштейна. Мы знаем, что в действительности Вселенная родилась не из бесконечно малой точки, но о сверх ранних этапах ее эволюции еще ничего не известно. Мы знаем лишь то, что тогда все четыре взаимодействия были

слиты воедино, материя и энергия тоже слились и стали неразличимы, а температура превосходила 1032 К. Затем Вселенная равномерно расширялась «по Фридману» до тех пор, пока из-за этого расширения плотность материи не стала малой. На рубеже этой эпохи внутреннее давление ложного вакуума пересилило силу гравитации и расширение Вселенной стало ускоренным. Она расширялась все быстрее, пока ложный вакуум не потерял устойчивости. Тогда из него заново родилась горячая материя с температурой около 1023 К, а расширение снова стало фридмановским и осталось таким до сих пор. Скорость этого расширения медленно убывает под действием силы тяготения, температура продолжает неуклонно падать. Мы проследили эту стадию до тех пор, пока температура не упала примерно до 4000 К. Возраст Вселенной тогда лежал в пределах от 500 000 до 700 000 лет. При температуре в 4000 К электроны соединились с ядрами водорода и гелия, образовав нейтральные атомы. Вселенная, наполненная нейтральным газом, стала практически прозрачной для излучения. Фотоны и вещество продолжали расширяться вместе с расширяющимся пространством, но уже независимо.

Мы знаем, что, продолжая расширяться, излучение остывало и его современная температура, температура реликтового излучения, в нашу эпоху стала равной 2,7 К.

Теперь пора узнать, как происходило дальнейшее расширение вещества, которое в то время состояло на $\frac{3}{4}$ из водорода и на $\frac{1}{4}$ из гелия с ничтожной примесью тяжелого водорода — дейтерия и легкого изотопа гелия-3 и двух изотопов: лития-6 и лития-7. Все остальное вещество и антивещество, как мы знаем, аннигилировало задолго до того, породив кванты излучения — фотоны. Осталось еще множество нейтрино, которые перестали взаимодействовать с остальным веществом на ранних этапах эволюции Вселенной. Существенно, что к тому времени пространство было очень однородно заполнено излучением и веществом.

Теперь полезно еще раз вспомнить Ньютона, который 300 лет назад понял, что вещество, равномерно распределенное в пространстве, не может вечно оставаться в этом состоянии. Если пространство конечно, писал Ньютон, то под действием тяготения все вещество собралось бы в большую сферическую массу в середине этого пространства. Если же пространство бесконечно, то должно образоваться бесконечное количество таких больших масс, разбросанных далеко друг от друга.

Мы знаем, что этот же вывод сохраняется и в Общей теории относительности. Гравитационные силы, силы тяготения, действовали с самого начала эволюции Вселенной. Но на ранних стадиях образованию комков вещества препятствовало внутреннее давление ложного вакуума. А до стадии быстрого расширения и после нее, когда Вселенная была раскаленной и непрозрачной для излучения, сжатие препятствовало давлению излучения.

Только после того как при 4000 К вещество стало прозрачным для излучения, дальнейшая эволюция Вселенной начала протекать под преимущественным влиянием гравитации.

В соответствии с мнением Ньютона, малые случайные увеличения плотности вещества начали притягивать соседнее вещество, все больше увеличивая избыточную плотность.

Астрономические наблюдения позволили установить три характерные особенности структуры современной Вселенной (речь идет только о видимой части Вселенной размером 1028 см).

Первая особенность: если оценивать распределение вещества по огромным частям Вселенной размером в сотни миллионов световых лет (около $3 \cdot 10^8$), то оно оказывается в среднем однородным.

Вторая особенность: галактики, подобные той Галактике, в которой находится Солнце и мы с вами, распределены в пространстве неоднородно. Они отчетливо группируются в еще более крупные структуры — скопления галактик и сверхскопления.

Третья особенность: наряду с этими сверхскоплениями галактик во Вселенной существуют огромные области, где нет ни галактик, ни скоплений галактик.

Эти «пустые» области окружены сверхскоплениями так, что распределение вещества

во Вселенной напоминает нерегулярные пчелиные соты. Стенки их образованы сверхскоплениями, там, где встречаются грани этих стенок, в ребрах «сот», плотность галактик особенно велика. Внутри «сот» нет галактик.

Теория, способная правильно описать возникновение неоднородностей в изначально однородной Вселенной, основана на фундаментальном исследовании, опубликованном советским физиком-теоретиком Е. М. Лифшицем в 1946 году. Эта работа выполнена до открытия реликтового излучения (1964 год) и до всеобщего признания теории Большого взрыва.

Теория Лифшица осталась справедливой и в наши дни. Изменились лишь величины, которые следует подставлять в его уравнения. Теперь это должны быть величины, учитывающие современный сценарий эволюции Вселенной и, в частности, роль нейтрино, которые рождались на самых начальных этапах эволюции и затем, на первых секундах эволюции Вселенной, потеряли контакт с остальной материей.

Теперь мы возвратимся к скрытой массе, которую все чаще называют темной массой.

Массу многих скоплений галактик можно определить, наблюдая, как распределены в пространстве и как движутся входящие в них галактики.

Можно поступить иначе: определить массу типичной галактики и умножить ее на количество галактик, входящих в скопление.

Естественно предположить, что при тщательных астрономических наблюдениях и правильных вычислениях оба пути приведут к одинаковому результату.

Но это не так. Первый способ — непосредственное определение массы скопления галактик из наблюдений их вращения — дает в десять — двадцать раз большее значение, чем второй, основанный на суммировании.

Это значит, что в состав скопления галактик входит масса, не поддающаяся непосредственному наблюдению.

Такое же расхождение получается при определении массы типичной галактики. Если вычислять ее по наблюдениям движения входящих в нее звезд, то результат в десять — двадцать раз превышает тот, что получается умножением массы типичной звезды на количество звезд в галактике.

Наблюдения, на основе которых выполнены эти вычисления, очень сложны и трудоемки, точность их невелика. Но наличие скрытой массы, в двадцать — тридцать раз превышающей по величине видимую массу, теперь признается большинством астрофизиков.

До 1980 года проблема скрытой массы казалась неразрешимой. Оценки показывали, что масса, порожденная энергией одного реликтового фотона, составляет 10-36 грамма. В нашу эпоху в каждом кубическом сантиметре пустого пространства содержится около 500 таких фотонов. Значит, плотность массы реликтового излучения составляет около $5 \cdot 10^{-34}$ грамма на кубический сантиметр. Это примерно в 2000 раз меньше средней плотности обычного вещества во Вселенной. До 1980 года большинство физиков считало, что нейтрино движутся со скоростью света, а следовательно, их масса покоя, как и масса покоя фотона, равна нулю. Средняя масса, связанная с движением реликтовых нейтрино, а их около 150 в каждом кубическом сантиметре, оценивалась приблизительно в $1,5 \cdot 10^{-34}$ грамма в кубическом сантиметре. Таким образом, вычисления показывали, что доля фотонов и нейтрино в образовании скрытой массы пренебрежимо мала.

Однако Зельдович и некоторые другие физики давно указывали на некоторый произвол гипотезы о том, что нейтрино не имеет массы покоя. Эта гипотеза была предложена «изобретателем» нейтрино Паули как самая простая. (Паули сделал вывод о существовании нейтрино для того, чтобы ликвидировать кажущееся нарушение законов сохранения энергии и движения (импульса) в процессе радиоактивного бета-распада.) Зельдович писал, что гипотеза об отсутствии массы покоя у нейтрино не следует из фундаментальных законов природы. Что при помощи нейтрино, имеющего небольшую массу покоя, можно с успехом свести концы с концами в балансе энергии и импульса при бета-распаде.

Постепенно все больше ученых начало склоняться к тому, что нейтрино обладают

небольшой массой покоя. Экспериментаторы начали ставить сложные опыты, с тем чтобы проверить, какая из возможностей реализуется в природе. Первые сообщения об открытии и измерении массы покоя нейтрино, рождающихся при бета-распаде, подвергались придирчивой критике противников существования этой массы и оказывались необидительными.

Наконец весной 1980 года группа сотрудников Института теоретической и экспериментальной физики АН СССР, руководимая В. Любимовым и Е. Третьяковым, опубликовала результаты многолетних наблюдений. Они с большой достоверностью свидетельствуют о том, что нейтрино, рождающиеся вместе с электронами или позитронами, действительно имеют массу покоя. Их масса оценена приблизительно в 6–10⁻³² грамма — примерно в 200 раз больше, чем средняя плотность массы, обусловленной движением всех нейтрино, пролетающих ежесекундно через объем, равный одному кубическому сантиметру, если по-прежнему считать, что нейтрино лишены массы покоя. Величина массы покоя нейтрино еще подлежит уточнению. Опыты очень сложны. Но сам факт, по-видимому, установлен надежно.

Физики знают, что, кроме электронных нейтрино, существует еще два сорта нейтрино. Уже появились сообщения об измерениях, показавших, что и их массы покоя отличны от нуля.

Это значит, что нейтрино движутся со скоростями, меньшими скорости света, что скорости реликтовых нейтрино уменьшаются по мере расширения Вселенной.

Все это играет большую роль в эволюции Вселенной.

Советские физики С. Герштейн и Зельдович еще в 1966 году, исходя из мнения о том, что нейтрино могут иметь массу покоя, обсуждали вопрос о том, как это проявилось бы в эволюции Вселенной. После 1980 года обсуждение этого вопроса опирается на опытный факт.

Роль нейтрино оказывается решающей, несмотря на то что масса нейтрино в 4·10⁷ раз меньше массы протона. Но во Вселенной в среднем их в 10⁹ раз больше, чем протонов. Мы говорим «в среднем», потому что протоны сосредоточены главным образом в небесных телах, а нейтрино рассеяны по всей Вселенной, хотя и не равномерно.

Расчет, основанный на этих двух цифрах, показывает, что общая масса всех нейтрино в 10–30 раз превышает общую массу всего остального вещества. Так решилась загадка скрытой массы, которую мы обсуждали выше. Это значит, что сила тяготения, гравитация, обусловленная нейтрино, играет основную роль при расширении Вселенной, тормозя его. Нейтрино доминируют в расширении Вселенной потому, что масса, скрытая в остальном веществе, составляет от 3 до 10 процентов общей массы. Это лишь примесь к главной массе — совокупной массе нейтрино.

Можно считать случайным, что вычисление средней плотности массы нейтрино дает приблизительно 10⁻²⁹ грамма на кубический сантиметр. Эта величина многозначительна — она совпадает с критической плотностью, определяющей судьбу Вселенной Фридмана — Эйнштейна. Но нельзя отмахнуться от того, что именно к этой величине приводят все современные варианты сценариев эволюции Вселенной. Уточнение величины массы всех трех сортов нейтрино решит вопрос о том, будет ли Вселенная расширяться вечно. Или гравитация совокупной массы нейтрино через миллиарды лет остановит ее расширение и превратит его в последующее сжатие, а это закончится грандиозным коллапсом — Вселенная вновь сосредоточится в ничтожном начальном объеме.

Теперь мы готовы вместе с учеными проследить за ходом эволюции Вселенной после того, как она стала прозрачной для реликтового излучения. После этого рубежа должны были сформироваться галактики и звезды. Но ученые не могли продвинуться за этот рубеж столь же уверенно, как они подошли к нему, все более удаляясь от Большого взрыва. Самые современные сценарии требовали искусственных предположений для того, чтобы избежать противоречий с наблюдениями астрофизиков.

Прежде чем продвигаться вперед, ученые должны были привести в порядок тылы.

Пересмотреть сценарий эволюции Вселенной, составленный тогда, когда авторы сценария считали нейтрино лишенными массы покоя и движущимися всегда со скоростью света.

ГЛАВА 8

ОТ НАСТОЯЩЕГО К БУДУЩЕМУ

Где начало того конца, которым оканчивается начало?

Козьма Прутков

Смена ролей

Вспомним начало существования Вселенной — сверхгорячая плазма, в которой постоянно рождались и аннигилировали все известные и еще не известные частицы. В то время плотность массы этого конгломерата частиц была больше плотности ложного вакуума. Затем, в ходе фридмановского расширения, когда объем Вселенной быстро увеличивался, средняя плотность массы этих частиц стала меньше плотности ложного вакуума. И его внутреннее давление, преодолевая тяготение вещества, заставляет Вселенную расширяться во все ускоряющемся темпе, не менее чем в 10^{50} раз. При этом исходное вещество, распределившись по этому огромному объему, перестало играть роль в дальнейшей эволюции.

Все детали раннего периода эволюции Вселенной «забылись». Дальнейшая эволюция Вселенной не зависит от начальных условий. Космология окончательно освободилась от ссылок на акт божественного творения.

Ускоряющийся рост объема Вселенной прекратился из-за того, что ложный вакуум потерял устойчивость и распался, порождая массу элементарных частиц, нагретых приблизительно до 10^{23} К. Теперь все идет совершенно закономерно, в соответствии со стандартным сценарием. Вселенная заполнена фотонами, лептонами, кварками, антилептонами и антикварками.

В ходе дальнейшего охлаждения частицы аннигилировали с античастицами, порождая фотоны. Это продолжалось до тех пор, пока не осталось «небольшого» количества частиц, для которых не нашлось античастиц. И, не имея возможности аннигилировать, они стали тем, из чего сформировалось все вещество современной Вселенной.

Написав «небольшое» количество», мы имели в виду, что одна частица приходилась на миллиард фотонов и миллиард нейтрино.

Здесь начинается различие между предсказанием и реальностью.

Еще недавно считалось, что основную часть плотности массы Вселенной составляет обычное вещество. Подсчеты показывали, что средняя плотность массы обычного вещества составляет примерно $3 \cdot 10^{-31}$ грамма на кубический сантиметр, а плотность массы реликтовых фотонов и нейтрино вместе 10^{-33} грамма на кубический сантиметр.

Теперь мы знаем, что средняя плотность массы реликтовых нейтрино близка к 10^{-29} грамма на кубический сантиметр.

Роли вещества и нейтрино в дальнейшей эволюции Вселенной поменялись. Теперь оказалось, что главное определяют нейтрино, а обычное вещество играет подчиненную роль.

Мы знаем, что на рубеже первой секунды при температуре 10^{10} К средняя плотность массы Вселенной уменьшилась настолько, что нейтрино, двигавшиеся при этой температуре со скоростями, близкими к скорости света, практически перестали взаимодействовать с обычным веществом, свободно перемещаясь в расширяющемся пространстве. При этом средняя плотность массы нейтрино во Вселенной всюду одинакова, так как любое малое

сгущение рассасывается за счет ухода из него более быстрых нейтрино.

По мере расширения Вселенной, а в это время оно происходит в соответствии со стандартным сценарием, то есть по Фридману, нейтрино, как и остальное вещество, непрерывно остывают, а скорость их движения соответственно убывает. Расчеты показывают, что вследствие этого в стандартном сценарии возникает новый характерный рубеж. Приблизительно через 300 лет после Большого взрыва скорость нейтрино падает настолько, что они не успевают выравнять случайные неоднородности своего распределения в пространстве. Это значит, что выравнивание средней плотности нейтрино успело произойти только в областях, размеры которых через 300 лет после начала расширения Вселенной не превышали 300 световых лет.

Теперь, когда уменьшившаяся скорость нейтрино не позволяет им выравнивать случайные отклонения плотности в областях этих размеров, гравитационные силы начинают стягивать эти области к их центру. Астрофизики сумели вычислить, какова суммарная масса всех нейтрино, заключенных в таких областях. Она оказалась огромной, равной приблизительно 10^{15} солнечных масс.

Еще в середине семидесятых годов Зельдович установил, что процесс сжатия в космосе огромных масс силами тяготения оказывается неустойчивым. Хотя первоначально сила тяжести, действующая на каждую частицу, направлена к центру их масс, частицы, вопреки мнению Ньютона, не соберутся в сферическое тело. Космические структуры, образующиеся в таких условиях, оказываются сильно сплюснутыми. Зельдович назвал их блинами. Такими плоскими дисками предстает перед астрономами подавляющее большинство галактик, в том числе и наша Галактика.

Проводя эти исследования, Зельдович не ограничивался определенными частицами. Его выводы применимы и к нейтрино.

Ввиду того что исходные неоднородности, дающие начало образованию блинов, расположены хаотически, столь же хаотическим оказывается расположение блинов. Соприкасаясь между собой, они образуют незримые гигантские нейтринные соты. Между стенками сотов очень мало нейтрино и обычного вещества.

Процесс образования нейтринных сотов длится миллионы лет. Гравитация, обусловленная нейтрино, увлекает за собой и обычное вещество. Лишь фотоны, для которых Вселенная уже давно (после $3 \cdot 10^5$ — $5 \cdot 10^5$ лет) прозрачна, продолжают расширяться вместе со Вселенной. Плотность их распределения в пространстве сохраняет однородность. Их температура постепенно уменьшается к ее современному значению 2,7 К. Вместе со Вселенной продолжают разбегаться и центры огромных масс, образующих блины: блины растягиваются, основное количество нейтрино оказывается сосредоточенным там, где соприкасаются два или три блина.

Именно в этих областях под влиянием гравитации, обусловленной нейтрино, возникают скопления обычного вещества, из которого формируются скопления галактик, галактики и звезды.

Мы знаем, что общая масса нейтрино в таком блине равна 10^{15} солнечных масс. А обычного вещества в нем в 30 раз меньше. Значит, количество обычного вещества, сосредоточенного здесь, составляет $3 \cdot 10^{13}$ солнечных масс.

Эти результаты хорошо согласуются с астрономическими данными о форме и массе больших скоплений галактик. Так астрономические наблюдения еще раз подтвердили обоснованность современного сценария эволюции Вселенной и достоверность экспериментальных данных о массе покоя нейтрино.

Теперь мы готовы к рассказу о дальнейшей судьбе обычного вещества, сосредоточенного в стенках нейтринных сотов. Нейтринные стенки сотов местами утолщаются, образуя ячеисто-сетчатую структуру. В толщу вытянутых «нитевидных» элементов каркаса этой структуры погружена иерархия сверхскоплений, скоплений галактик и галактик. Между «нитевыми каркаса» находятся дыры — области приблизительно сферической формы, в которых практически нет обычных галактик. Средний диаметр дыр

примерно в 5 раз больше толщины «нитей», образующих каркас сот.

Следующими в иерархии структур, образованных обычным веществом, являются протозвездные сгущения. В процессе гравитационного сжатия они образуют звезды. Астрономы называют эти звезды — звездами первого поколения.

Эти звезды имеют мало общего с современными звездами, состоящими из тех же химических элементов, что и Солнце и Земля. Звезды первого поколения состоят из вещества, рожденного на ранних стадиях эволюции Вселенной. А мы знаем, что в ходе стандартного сценария эволюции Вселенной смогли образоваться только самые легкие элементы: водород, гелий и в небольших количествах литий, а также их изотопы.

Итак, звезды первого поколения состояли на $3/4$ из водорода и на $1/4$ из гелия. Кроме того, было совсем мало тяжелого водорода — дейтерия и легкого изотопа гелия (гелий-3) и еще меньше изотопов лития.

Звезды первого поколения претерпели очень быструю эволюцию, которая для большинства из них завершилась колоссальным взрывом. Перед этим взрывом вещество звезды было сильно сжато и раскалено. В этих условиях развивались быстрые термоядерные реакции. Температура резко возрастала, возрастало и давление, вызывающее на определенном этапе взрыв звезды. Высокая плотность и огромная температура создавали условие для образования неустойчивых ядер, состоящих из восьми ядерных частиц. Сколь ни мало время жизни этих ядер, при огромной плотности к ним успевали присоединиться нейтроны, порождая устойчивые ядра из четырех протонов и пяти нейтронов. Теперь ничто не сдерживало последовательного усложнения ядер, так что в ходе короткой (в космических масштабах) жизни и взрыва звезд первого поколения рождались ядра всех известных нам химических элементов. Энергия взрыва разбрасывала их в космическом пространстве. После того как «продукты взрыва» охлаждались ниже 4000 К, новорожденные ядра присоединяли к себе электроны, образуя нейтральные атомы.

Блуждая в пространстве, эти атомы частично соединялись, образуя молекулы и пылевидные твердые частицы. Так возникали газовые и газопылевые облака.

Но эти облака не могли противостоять силам гравитации. Под воздействием гравитации плотность этих облаков увеличивалась. Сталкиваясь между собой, пылинки, молекулы и атомы разогревались. Так возникали протозвезды второго поколения. Сжимаясь, они превращались в звезды, сияющие на нашем небосводе. Большинство из них входит в состав галактик, а те в свою очередь группируются в скопления, остающиеся в пределах породивших их нейтринных блинов. Все звезды, входящие в галактики, видимые при помощи наиболее крупных телескопов и радиотелескопов, состоят из звезд второго поколения. Звезды первого поколения давно закончили свое существование. Но астрономы и сейчас видят взрывы сверхновых звезд, входящих во второе поколение. Взрывы, создающие условия для возникновения звезд следующих поколений.

Нейтрино, образующие блин, постепенно, под действием гравитации, все больше сосредотачиваются вокруг галактик. Поэтому галактики окружены незримым облаком нейтрино, масса которых приблизительно в 30 раз превышает массу обычного вещества в этой галактике. Астрофизики называют эти облака «нейтринным гало», уподобляя их видимым в морозные ночи ореолам вокруг Луны.

Здесь нет места для рассказа о дальнейшей эволюции звезд второго поколения, о новых и сверхновых, нейтронных звездах — пульсарах, о квазарах, остающихся еще полными тайн. О них мы уже кое-что сказали раньше, и все сказанное там осталось неизменным, подобно тому как стандартный сценарий эволюции Вселенной не претерпел изменения в результате продвижения ученых в глубь интервала времени, лежащего между 10^{-3} и 10^{-43} .

Для того чтобы наш рассказ не остался неполным, познакомимся с тем, что узнали ученые о будущем Вселенной.

Вероятное будущее

Сейчас невозможно точно сказать, будет ли Вселенная расширяться вечно или ее расширение прекратится. Точность определения средней плотности массы Вселенной еще недостаточна для выбора одной из этих возможностей.

Если Вселенная будет расширяться неограниченно, то все звезды погаснут из-за истощения запасов ядерной энергии. В зависимости от массы звезды ее судьба может быть различной. Звезды аналогичные Солнцу через несколько миллиардов лет станут белыми карликами и будут постепенно остывать. Звезды второго поколения, более массивные, чем Солнце, превратятся в нейтронные звезды, если их масса вдвое больше массы Солнца, или в черные дыры, если их исходная масса превосходит массу Солнца более чем втрое.

Дольше других проживут самые малые звезды второго поколения, с массой меньшей, чем у Солнца. Они медленно остынут, постепенно охлаждаясь и, минуя состояние белых карликов, станут холодными черными карликами. Так, за время около 10¹⁴ лет закончится эволюция звезд.

Теперь посмотрим, что станет за это время с галактиками. Галактики содержат сотни миллиардов звезд, а в центре их, вероятно, находятся сверхмассивные черные дыры. За время в 10¹⁴ лет в таких галактиках постоянно протекают процессы, аналогичные тем, что происходят в газах.

В результате многочисленных хаотических взаимодействий (это гравитационные взаимодействия, самые слабые в атомных масштабах, но приобретающие преобладающее значение в будущем космических систем), при которых звезды обмениваются своей кинетической энергией, они разделятся на две категории. Примерно 10 % из них потеряют свою скорость и будут затянуты в сверхмассивную центральную черную дыру. Перед этим огромные гравитационные силы черной дыры разрушат их, превратят их в пыль. Некоторые звезды, обращаясь все быстрее вокруг черной дыры, будут перед падением сталкиваться между собой и превращаться в газ. Эта газопылевая смесь будет засосана в черную дыру.

Остальные звезды, примерно 90 % из входящих в каждую галактику, покинут ее, чтобы затеряться в межгалактическом пространстве.

Разделение звезд, входящих в галактики, на те, что попадают в центральную черную дыру, и на межгалактических странниц, потребует 10⁷ лет, когда все звезды давно погаснут и станут «холодным пеплом эволюции».

Что же дальше?

Дальше начнут играть роль процессы распада протонов, предсказываемые теорией Великого объединения. Освобождающиеся при этом нейтроны распадаются очень быстро. Среднее время жизни протонов оценивается в 10³² лет. За это или за несколько большее время все ядерные частицы в остывших звездах распадутся, порождая в конечном итоге фотоны, нейтрино и электронно-позитронную плазму.

В результате все угасшие звезды превратятся в свободные фотоны и нейтрино. Они будут сосуществовать с очень разреженной плазмой из электронов и позитронов, оставшихся от распада ядерных частиц. При этом вероятность встречи электрона и позитрона, оканчивающейся их аннигиляцией и рождением фотонов, будет постепенно уменьшаться. В ходе продолжающегося расширения средняя плотность фотонов и нейтрино и их масса будет уменьшаться. Будет уменьшаться и плотность электронно-позитронной плазмы. Поэтому через 10³³ лет на первый план выдвинутся остальные 10 % массы, сосредоточенной в черных дырах. Еще в начале семидесятых годов ученые думали, что черные дыры вечны, потому что ничто не может вырваться из их гигантского гравитационного поля.

Но в 1974 году С. Хокинг установил, что в поле тяготения черных дыр происходит рождение частиц. Черная дыра «испаряется», постепенно превращаясь в фотоны, нейтрино и гравитоны — кванты поля гравитации. Малые черные дыры испаряются сравнительно быстро (быстро в космических масштабах). Черная дыра с массой в 10 солнечных масс испарится за 10⁶⁹ лет, а массивная черная дыра, выросшая в центре галактики, испарится только за 10⁹⁶ лет.

Во Вселенной вновь наступит эра с преобладанием излучения. Но при дальнейшем

расширении масса фотонов будет продолжать уменьшаться. И когда возраст Вселенной достигнет 10^{100} лет, средняя плотность массы, эквивалентной энергии фотонов, станет исчезающе малой. Во Вселенной останутся только электроны, позитроны и нейтрино. Но плотность образованной ими плазмы тоже станет ничтожной. Одна частица будет приходиться в среднем на объем 10^{85} объемов современной Вселенной.

Читатель вправе снова спросить: что же потом?

Ученые не дают на это определенного ответа. Но они говорят: ведь, кроме чрезвычайно редких электронов, позитронов и нейтрино, останется вакуум. А вакуум, как мы знаем, не пуст. В нем постоянно рождаются и исчезают пары виртуальных частиц. Значит, в этом вакууме заключена определенная энергия. Теория допускает, что этот вакуум в далеком будущем испытает фазовый переход, в ходе которого из виртуальных частиц и античастиц возникнут реальные частицы и античастицы. Их будет много больше, чем реликтовых электронов, и позитронов, и нейтрино. Этот переход, это рождение реальных частиц и античастиц может остановить расширение Вселенной и вызвать ее сжатие.

И после все ускоряющегося сжатия, в ходе которого температура превзойдет 10^{32} К, а плотность превзойдет 10 граммов на кубический сантиметр, сжатие сменится новым расширением. Начиная с 10^{-34} с новой фазы расширения повторится все то, о чем нам уже сообщили ученые.

Но есть и иная возможность.

Если новые опыты не опровергнут наличия массы покоя нейтрино, то сценарий будущего может сильно отличаться от изложенного выше.

Пусть масса нейтрино очень мала, пусть она в сотни тысяч раз меньше массы электрона, тогда присутствие нейтрино не скажется вплоть до эпохи черных дыр, но может уменьшить время до того момента, когда расширение сменится сжатием.

Если же масса нейтрино не очень мала, если она «всего» в пять сотысячных раз меньше массы электрона, то общая масса реликтовых нейтрино превысит значение критической массы и гравитационные силы этих нейтрино остановят расширение Вселенной задолго до того, как погаснут звезды. Затем Вселенная начнет сжиматься, коллапсируя в свое исходное состояние. А дальше новый цикл расширения, но не через 10^{100} лет, как получилось в предыдущем варианте, а «всего» через 10^{10} — 10^{11} лет. Примерно через столько, сколько прошло от самого раннего момента, о котором мы знаем (10^{-34} с), до наших дней.

Будет ли все это повторяться вечно?

Ответа на этот вопрос еще нет. Классическая термодинамика говорит, что длительность цикла, состоящего из расширения и сжатия, будет раз за разом увеличиваться.

Но учет квантовых процессов может внести поправки и в этот ответ.

Антропный принцип

Наименование принципа, взятого в качестве заглавия этого раздела, происходит от греческого слова «антропос» — человек. Это название утвердилось в науке и вошло в наш научный язык. Его точным переводом было бы «человеческий принцип». Он встречается сейчас во многих научных статьях. Зачастую становится предметом обсуждения, когда ученый попадает в компанию людей, интересующихся проблемами науки, но не занимающихся ею профессионально. Впрочем, иногда речь об антропном принципе возникает и тогда, когда астрофизик попадает в тупик. Астрофизики, встречающиеся с вопросом, ответа на который они не знают, иногда ссылаются на антропный принцип. Суть такого ответа может быть выражена словами: «Я не знаю ответа на этот вопрос, я не могу объяснить того, почему природа ведет себя так, а не иначе. Но если бы она вела себя иначе, не могли бы возникнуть жизнь и человек, задающий этот вопрос».

Корни антропного принципа уходят в далекое прошлое. Древнегреческий философ и математик Пифагор, родившийся в 582 году до нашей эры, обнаружил целый ряд

закономерностей, связывающих между собой некоторые числа. Он установил, что особые сочетания или отношения чисел связаны с формой геометрических фигур (например, теорема Пифагора) и с некоторыми физическими процессами (например, связь тонов, испускаемых струнами, с длиной этих струн). Пифагор считал, что число есть сущность всех вещей и что Вселенная представляет собой гармоническую систему чисел и их соотношений. Обдумывая это, он пришел к выводу, что числа, а не боги управляют миром.

Союз, созданный Пифагором в г. Кротоне в Южной Италии, был одновременно философской школой и политической партией. Он работал в условиях секретности. Желавший вступить в него подвергался испытанию пятилетним молчанием.

Замкнутость пифагорейского союза привела к тому, что достоверных сведений о жизни и деятельности Пифагора, а также письменных прижизненных изложений его учения не сохранилось.

Позднейшие пифагорейцы придали учению Пифагора чисто мистический смысл и построили на этой основе идеалистическое учение.

При изучении природы люди часто встречались со странными и непонятными закономерностями, связывающими числа, возникающие в ходе таких исследований. Например, Кеплер, изучая теорию Коперника, обнаружил, что радиусы планетных орбит относятся между собой как числа 8:15:20:30:115:195. (В его время были известны только шесть планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн.) Кеплер писал: «Я размышлял над этим со всей энергией, на которую способен мой ум».

Кеплер приступил к кропотливым построениям и вычислениям. Внезапно он вспомнил: греческие математики доказали, что среди пространственных фигур — многогранников могут существовать лишь пять правильных фигур, все грани и углы которых одинаковы. Пять многогранников. При их помощи можно построить шесть сфер. Шесть сфер — шесть планет!

Проделав огромную работу, Кеплер показал, как можно построить пять таких многогранников, чтобы радиусы связанных с ними сфер находились в тех отношениях, которые он получил для планетных орбит.

Теперь мы знаем, что результат, полученный Кеплером, — лишь случайное совпадение.

По поводу подобных чудесных совпадений Эйнштейн писал: «Целью всей деятельности интеллекта является превращение некоторого «чуда» в нечто постигаемое».

В тридцатых годах нашего века один из крупнейших астрофизиков — А. Эддингтон и один из создателей современной квантовой физики — П. Дирак обратили внимание на странное совпадение ряда чисел, возникающих при исследовании микромира и макромира. Такое совпадение обнаруживается при сравнении между собой некоторых величин, полученных при независимом изучении этих столь далеких одна от другой областей. Удивительным было и то, что отношения многих величин, кажущихся совершенно несвязанными между собой, приводят (точно или с небольшими погрешностями) к одному и тому же колоссальному числу 10^{40} или к небольшим степеням этого числа.

Мы уже приводили некоторые величины, за пределами которых теряют силу известные нам физические законы. Напомним их. Это планковская длина 10^{-33} см и планковское время 10^{-43} с. Современная наука не может гарантировать, остаются ли пространство и время непрерывными там, где существенную роль приобретают еще более малые интервалы длины и времени. Заметим, что планковское время равно времени, которое затратит свет на прохождение планковской длины.

Первое странное совпадение, которое имели в виду Эддингтон и Дирак, возникает, если сравнить возраст Вселенной (около 10^{10} лет, то есть около $3 \cdot 10^{17}$ с) с временем, нужным свету для того, чтобы пересечь ядро атома (10^{-24} с). Его называют «ядерным временем». Их отношение приблизительно равно 10^{40} . В свою очередь отношение «ядерного времени» (10^{-24} с) к планковскому времени равно приблизительно 10^{20} , то есть корню квадратному из «магического» числа 10^{40} .

Это число можно назвать магическим потому, что оно появляется во многих других случаях, но никто не знает, почему оно возникает. Например, отношение возраста Вселенной к планковскому времени близко к $(1040)^{3/2}$ – Число ядерных частиц внутри современного горизонта равно $(1040)^2$. Время жизни типичной звезды в 1040 раз больше «ядерного времени», а сила гравитации в атоме водорода в 1040 раз слабее электромагнитных сил, действующих внутри этого атома.

Во все процессы, включающие взаимодействие вещества и электромагнитного поля, входит численный коэффициент, получивший название коэффициента тонкой структуры.

Эта величина была впервые обнаружена при подробном исследовании структуры оптических спектров атомов, что и объясняет ее наименование. Она равна почти точно $1/137$. Аналогичная величина для силы гравитации равна приблизительно 10^{-40} .

Имея в виду странное совпадение многих величин, характеризуемых одним и тем же колоссальным числом 1040 , Дирак в 1938 году написал: «Можно предположить, что такое совпадение является следствием некоторой глубокой связи в природе между космологией и атомной теорией».

Хочется подчеркнуть, что Дирак, принадлежащий к крупнейшим ученым современности, проявил в этой фразе глубокую уверенность в познаваемости природы. Верным оказалось и его предвидение. Свойства космоса и элементарных частиц, как мы видели выше, действительно связаны единством взаимодействий, управляющих всем материальным миром.

В противоположность мнению Дирака, сторонники антропного принципа утверждают, что эти и другие странные совпадения чисел, характеризующих свойства природы, являются случайными. Но, говорят они, можно проверить и убедиться в том, что отклонения от этих совпадений повлекли бы за собой столь существенные изменения свойств природы, что в ней не могли бы возникнуть условия для существования людей.

Одни из них говорят: в принципе возможны и другие вселенные с другими магическими числами, но там нет людей, способных изучать природу.

Другие говорят: совпадение чисел не случайно — это предусмотрено творцом природы, богом. Но промысел божий непостижим, поэтому не следует искать смысла в таких совпадениях.

Но большинство ученых исходят из того, что природа познаваема, что цель науки — познание природы, выявление сути природных явлений и процессов, использование полученных знаний на благо человечества.

Там, где сторонники антропного принципа видят случайность или непознаваемость, физика, астрофизика и космология обнаруживают для ученых-материалистов очередной стимул к познанию, усматривают вопрос, требующий исследования.

Многие ученые пытались выяснить основы единства природы. Интерес к этой проблеме возбуждается и тем, что космология накладывает жесткие пределы на целый ряд характеристик, от которых зависит эволюция Вселенной.

Пожалуй, самым впечатляющим доводом сторонников антропного принципа являлось ограничение на плотность вещества в начале фридмановского расширения Вселенной. Конечно, речь идет не о бесконечной плотности в недоступный момент начала этого расширения, когда вся Вселенная была сжата в бесконечно малом объеме.

Мы уже знакомы с этим ограничением: самым ранним моментом, о котором мы можем судить, является планковский момент времени: 10^{-43} с. Для того чтобы современный радиус видимой Вселенной был не менее 10^{28} см, что соответствует данным астрономов, средняя плотность массы Вселенной не должна в планковский момент времени превосходить критическую плотность на 10^{55} от величины критической плотности. Если эта величина превзойдена, то расширение Вселенной уже давно должно было прекратиться и она уже давно должна была сколлапсировать. Это произошло бы задолго до того, как возникли современные звезды и планеты, а значит, и жизнь современного типа. С другой стороны, если бы средняя плотность вещества Вселенной в планковский момент была меньше

критической плотности в столь же ничтожное число 10-55 раз, то расширение Вселенной происходило бы много быстрее и средняя плотность вещества в ней стала бы исчезающе малой, прежде чем могли возникнуть звезды и планеты и жизнь современного типа.

Существует еще несколько подобных жестких ограничений. Одно из них — ограничение массы типичных звезд, составляющих большинство во всех галактиках. К ним принадлежит и наше Солнце. Стоит массе звезды превзойти определенную величину, как звезда будет сиять ярким голубоватым светом. Астрономы называют такие звезды голубыми гигантами. Если же масса звезды немного меньше этой величины, она будет небольшой красноватой звездочкой — красным карликом. Подсчеты показывают, что масса звезды тесно связана с комбинацией постоянных величин, определяемых соотношением величины гравитационного взаимодействия и величины электромагнитного взаимодействия. Мы знаем, что внутри атомов величина гравитационного взаимодействия в 1040 раз слабее электромагнитного взаимодействия.

Удивительно: стоит этому отношению немного увеличиться (гравитационное взаимодействие чуть меньше или электромагнитное чуть больше) — и все звезды были бы голубыми гигантами. Стоит этому отношению немного уменьшиться — и все звезды были бы красными карликами.

Если бы природа не обеспечивала очень точного баланса, то не могло бы существовать Солнце, а вместе с ним и мы с вами.

Ученые до 1980 года не могли объяснить, чем обусловлена столь точная величина «стартовой плотности» Вселенной. Следуя Дираку, нужно было и в этом случае сказать, что такая «точная настройка» является следствием некоторой глубокой связи в природе, что задача ученых — выяснить природу этой связи, объяснить ее, исходя из фундаментальных фактов и непротиворечивых теорий.

Некоторые ученые, не видя возможности рационального объяснения совпадений ряда чисел или жесткой ограниченности величин других чисел, признают свое бессилие в выражениях, по существу признающих это результатом сознательной деятельности высших сил. Один из них, Дж. Барроу, пишет: «Многие наблюдения естественного мира, несмотря на априорную необычность, представляются в этом свете (в свете этих совпадений. — И. Р.) как неизбежные последствия нашего существования».

Другие, обсуждая эти совпадения, в той или иной форме ссылаются на антропный принцип. Они считают, что все закономерности, наблюдаемые в природе, могут быть объяснены одним аргументом: если бы это было не так, то человечество не могло бы существовать, а значит, некому было бы задавать вопросы.

Но большинство ученых, выступающих в своих профессиональных сферах как материалисты, сознательные или стихийные, придерживаются другой позиции. Они пытаются показать, что само существование жизни в известной нам форме является следствием тех закономерностей и тех характерных величин, которые существуют в реальном мире и которые мы познаем все полнее и все точнее.

Например, Р. Дикке, имя которого неоднократно появлялось на этих страницах, подходит к этой проблеме, не прибегая к антропному принципу, а привлекая на помощь физику еще и биологию. Он опирается на то, что эпоха, в которую живет человечество, а особенно ее современная фаза с развитой наукой и технологией, занимает ничтожно малую долю в эволюции Вселенной. Он говорит о том, что отрезок времени, в который человек разумный достиг современного уровня, определен не случаем и не произволом творца, а связан с характерной длительностью определенных физических процессов.

Дикке обращает внимание на то, что в основе органической жизни земного типа лежит углерод, а также азот и кислород, которых не было на ранних стадиях эволюции Вселенной. Образование атомных ядер в первичной Вселенной закончилось на ядрах гелия. Остальные элементы, в том числе и необходимые для жизни, возникли в результате процессов, протекающих в недрах звезд при больших давлениях и температурах. Затем, при взрывах тех из звезд, которые прошли стадию сверхновых, ядра этих химических элементов были

выброшены взрывом звезды и рассеяны в пространстве. Из этого «сырья» возникли современные звезды и галактики. Оценка времени, необходимая для того, чтобы Вселенная пришла в современное состояние, совпадает с тем, что нужно для появления объективных возможностей возникновения жизни.

Б. Карр и М. Рис указали, что теория Великого объединения позволяет вычислить, что с учетом известных из опыта величин время, прошедшее между Большим взрывом и нашей эпохой (примерно 10^{10} лет или $3 \cdot 10^{17}$ с), оказывается в 10^4 раз больше «ядерного времени», о котором говорилось в начале этого раздела (время, за которое свет пересекает атомное ядро, — около 10^{-24} с). Так современная физическая теория позволяет понять то, что раньше было непознанным и считалось случайным, необъяснимым без привлечения антропного принципа.

Мы видели, что современные сценарии эволюции Вселенной приводят к выводу о том, что наша Вселенная не охватывает всего сущего. На самых первых этапах эволюции возникло много изолированных частей — доменов, которые не обязательно были точными копиями того домена, из которого сформировалась наша Вселенная. Каждый из них мог развиваться иначе, в зависимости от небольших вариаций исходной массы вещества, заключенного в нем. В тех доменах, которые не сильно отличаются от нашего, возможно, разовьется жизнь, похожая на нашу. В других может не быть условий, необходимых для возникновения жизни. Мы познаем нашу Вселенную, наш мир и будем познавать его все более глубоко. Но другие миры, лежащие в других доменах, за нашим горизонтом событий, останутся недостижимыми для исследования, потому что ни один сигнал не может распространяться со скоростью, превышающей скорость света. Поэтому мы не можем посылать сигналы за горизонт событий и получать сигналы из-за него.

Можно ли считать на этом основании, что природа непознаваема?

Отнюдь.

Мы можем познавать природу на всех уровнях от элементарных частиц до Вселенной, со всеми ее деталями.

Мы уже poznали достаточно много. Мы обнаружили и целый ряд запретов.

Например: невозможна температура ниже абсолютного нуля, невозможна вечная жизнь для одного индивидуума, невозможна скорость, превышающая скорость света, невозможно ставить опыты за пределами горизонта событий...

Все это и многое другое составляет результаты процесса познания, является элементами знания. Путь выявления и накопления знаний безграничен.

Ибо каждый новый научный факт, каждая непротиворечивая научная теория являются ступенькой к обнаружению новых фактов, к построению новых, все более точных теорий, применимых ко все более широким областям знания.

Нужно лишь обеспечить, чтобы развитие науки не было прервано ядерной войной.

Для нас, людей Земли, не может служить утешением мысль о том, что высокоразвитые цивилизации существуют на других планетах или в других вселенных.

Мы, и только мы, можем и должны уберечь себя от самоуничтожения. Сохранить род человеческий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закончена книга. Многие люди сочиняли ее сюжет, чтобы ты, дорогой читатель, мог шагнуть в своем творчестве выше и дальше них. Потребовалось немало времени для того, чтобы рукопись превратилась в книгу. Закончив этот труд, автор ждет ответа читателя.

Сумела ли книга показать, что человеческое познание не имеет конца? Что бесконечно не только развитие науки, всей науки, науки в целом, но бесконечно и развитие каждой ее отдельной области. Бесконечны и возможности встреч разных научных направлений и рождение на этом пути новых непредвиденных направлений познания...

Любая кажущаяся узкой и ограниченной область науки имеет нечто общее с шагреновой кожей. Но шагреновая кожа Бальзака сжималась вслед за очередным свершением, сжималась, чтобы исчезнуть. Наука же с каждым свершением расширяется, и

отдельные ее оазисы, рассеянные в пустыне незнания, постепенно растут, то почти незримо, то огромными скачками. Растут, смыкаются, перекрываются, превращая пески невежества в плодородную почву знания.

Но когда, наслаиваясь, пирамиды знания поднимаются к небесам, с их вершин видны бескрайние пространства неведомого мира, который еще ждет своих первопроходцев.

Первопроходцы идут, сменяя друг друга, опираясь на вторые эшелоны, закрепляющие и углубляющие их прорывы.

Поэтому автор не может пребывать в праздности. Закончив рукопись этой книги, он вновь посещает лаборатории, вновь читает научные журналы, стремясь отобрать самое интересное, самое впечатляющее. Отобрать то, что он в силах понять, опираясь на доброжелательную помощь своих друзей — ученых. Вновь часами сидит за столом, стараясь рассказать об этом интересно и понятно. Например, о фантастическом продвижении физиков в понимании явления «высокотемпературной» сверхпроводимости, начавшемся на рубеже 1987 года. И о синтезе в Дубне 110 элемента таблицы Менделеева в августе этого же года и о синтезе 113-го элемента там же в 2003 году.

Кончая эту рукопись и начиная новую, автор горячо благодарит не только сотрудников издательства и типографии, но и ученых, тех, с кем ему удалось поговорить, за их великий труд на благо человечества, за глубокое наслаждение, которое доставляют простому человеку тяжкие и сладкие усилия, необходимые для приобщения к плодам науки.

Эти плоды обильны, их хватит на все поколения жаждущих истины. Будущее принесет нам более фундаментальные знания, более плодотворные идеи, более глубокие мысли; еще сильнее будет мощь человеческого разума. Но мы не уйдем далеко, если не будем сверять наши шаги в будущее с опытом, с ошибками прошлого. Это и стало задачей книг цикла «Предчувствия и свершения».

На дворе— XXI век. Бурное начало !

Ни один век не начинался с таким напором, с такими разочарованиями и такими обещаниями.

Какие предчувствия оправдались, какие свершения вселили надежду на светлое будущее человечества?

Сегодня — время осмыслить прошлое, извлечь из него все полезное, отбросить вредное.

Трилогия "Предчувствия и свершения" в канун нового столетия подводит итоги интеллектуальным достижениям человечества, старается угадать их развитие в будущем. Проводит анализ научных предчувствий и пытается оценить свершения, которые подарили нам предшественники. Те, кто поднял нас на свои плечи, чтобы мы смогли видеть дальше них.

Автор трилогии, завершая третий том, уверен и хочет уверить читателя в том, что и сегодня ни одно из предчувствий ученых, которые разгадывали тайны: Вселенной в предшествующие века, не оказалось лишним, ненужным. Все исследования имели смысл: они либо нащупали правильный ответ на поставленный вопрос, либо отбросили ошибочные варианты, а следовательно вышли на более прямой путь к истине. На каких-то перекрестках истории они вывесили указатели: "Пути нет", "Тупик" или "Горячо", "Путь к цели".

Ничто не пропало даром. Все пригодилось при переборе вариантов, столкновении мнений, дало толчок новым мыслям, догадкам, возбудили азарт к новым поискам, новым попыткам. Подстегнули игру ума...

Автор хочет обратить внимание читателя на особую композицию трилогии. Это не хронологическое изложение истории мысли в области натуральной философии /физике/, космологии, астрономии, математике и других основополагающих современных областях знания. Нет! Книги трилогии "Предчувствия и свершения", "Великие ошибки", "Призраки", "Единство" — это как бы три круга "ада" познания. Три ступени, три уровня научной цивилизации.

"Великие ошибки" иллюстрируют заблуждения ученых в результате незрелого

научного опыта. Еще нет у науки такого мощного орудия познания как целенаправленный эксперимент. Не нащупан верный критерий в отсеке ложного от истинного. Только Ньютон научит верному методу: начинать с эксперимента, результат проверять теорией и делать вывод после проверочного эксперимента.

Первый том рисует атмосферу интуитивного нащупывания истины.

Второе, "Призраки", это как бы следующий этап созревания ищущей мысли, когда к интуиции подключается воображение. Ученый целенаправленно ищет математическую модель исследуемого явления, привлекает аналогию из других областей знания. Это второй круг "ада познания" более высокий уровень квалификации исследователей. "Призраки" рассказывают о снах, которые умеют видеть ученые, чтобы представить то, что нельзя наблюдать. Они судят о жизни невидимого атома и далекого космоса.

И, наконец, третий том, "Единство" выводит читателя на современный уровень духовной зрелости человеческого интеллекта: осознание единства природы, а следовательно, единства законов природы. Следствие - возможность штурма очередных проблем: привлечением методов и знаний, добытых в других областях науки.

Отсюда и разные стили в изложении книг трилогии.

"Великие ошибки" написаны легким, почти сказочным языком. "Призраки" учитывают то, что читатель подрос, возмужал, поумнел в процессе чтения первой книги и ему можно доверить серьезные проблемы. Он уже более опытен, искушен в понимании драмы идей.

"Единство" — равноправный разговор с читателем. Автор призывает читателя включиться в битву за истинное знание, за построение современной духовной цивилизации. Надежда, расчет на то, что читатель посвятит свой интеллект разгадке, еще неразгаданных тайн природы.

Автор надеется, что после прочтения трилогии молодой человек будет готов к самостоятельной творческой деятельности к зрелому мышлению. Он постигнет логику науки, включится в трудную, увлекательную, всепоглощающую работу ума — познание мира.

Он овладеет новыми, еще не известными правилами игры, Игры Природы.

Москва, 8 февраля 2004 года