

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

530

ФИЗИКА В XX ВЕКЕ *)

B. Weisskopf

Обзор физики XX века поистине является весьма почетной и увлекательной задачей. Теория относительности, квантовая теория, атомная физика, молекулярная физика, физика твердого тела, ядерная физика, астрофизика, физика плазмы, физика элементарных частиц — все эти новые направления в развитии науки о природе являются детищами XX века.

В самом начале столетия произошли определенные изменения в характере физики как науки. Раньше физика покоилась на знании двух фундаментальных сил, действующих в природе: гравитационных и электромагнитных. Развитие классической механики, начиная с Галилея и Ньютона вплоть до Лагранжа и Гамильтона, продемонстрировало справедливость единого закона природы — закона гравитации — как на Земле, так и во всей Вселенной. Электродинамика, детище XIX века, развитая трудами Фарадея, Максвелла и Герца, оказалась первой существенной областью, где были применены широко распространенные ныне в физике полевые концепции. Была продемонстрирована определяющая роль электромагнитных сил в веществе. Описание электромагнитного поля в качестве независимого объекта в пространстве, открытия спектрального строения испускаемого телами излучения, электромагнитной природы света служат одними из крупнейших побед человека на пути к познанию окружающего мира. Однако в то время не удалось понять свойства вещества, вывести их из более простых концепций. Они измерялись и выражались с помощью специфических постоянных вещества, таких как упругость, сжимаемость, теплоемкость, вязкость, теплопроводность и электропроводность, диэлектрические и диамагнитные постоянные.

Нельзя сказать, что физики в XIX веке были абсолютно незнакомы с важной ролью межатомных сил в формировании тех или иных свойств вещества. Однако тогда не существовало какого бы то ни было метода, с помощью которого можно было бы определять природу этих межатомных сил и объяснить их величину в одних случаях или же полное отсутствие — в других. Объяснение наличия небывало большого разнообразия в свойствах разных элементов даже не рассматривалось в качестве физической задачи. Анализ и систематика элементов считались чисто химической проблемой. Столетие назад с этой задачей успешно справился Д. И. Менделеев, создав периодическую систему элементов. Специфические характеристики различных веществ, их типичные оптические спектры, химиче-

*) V. F. Weisskopf, Physics in the 20th Century, CERN Courier 9 (10), 295 (1969). Перевод И. М. Дрёмина.

ские связи в них — все это было известно химикам и размещено по каталогам. Однако изучение этого материала не представлялось физикам целесообразным.

Электрон был открыт еще в XIX веке. Стало очевидным, что электроны должны играть важную роль в строении атомов. Однако классическая физика не способна была предсказать, каким должно быть строение атома. Открытие кванта электрического заряда, определяющего все электрические и оптические явления, представляло собой начало движения по тому пути, на котором удалось получить наиболее глубокие знания о природе вещества. К сожалению, нам следует признать, что происхождение этого кванта заряда все еще служит основной загадкой природы и по сей день, спустя столетие после его обнаружения.

В физике XX век также начался в 1900 г. Эта дата взята мною не случайно. Именно в этом году была опубликована знаменитая статья Макса Планка о кванте действия. Поэтому 1900 г. можно считать годом рождения квантовой теории. Весьма впечатляющей является та скорость, с которой развивалась физика в первой четверти этого века: планковский квант действия в 1900 г., специальная теория относительности Эйнштейна в 1905 г., открытие Резерфордом строения атома в 1911 г., боровские квантованные орбиты и объяснение спектра водорода в 1913 г., общая теория относительности Эйнштейна в 1916 г., первые ядерные превращения, открытые Резерфордом в 1917 г., объяснение Бором периодической системы элементов (*Aufbauprinzip*) в 1922 г., открытие квантовой механики де Броилем, Гейзенбергом, Шрёдингером и Бором в 1924—26 гг., принцип Паули в 1925 г., работы Уленбека и Гаудсмита о спине электрона в 1927 г., релятивистская квантовая механика Дирака в 1928 г., теория химических связей, созданная Гайтлером и Лондоном в 1927 г., теория проводимости металлов, разработанная Блохом и Зоммерфельдом в 1930 г. Давайте остановимся на этом, хотя скорость развития никоим образом не уменьшилась в 1930 г., а наоборот, это развитие было весьма бурным, по крайней мере еще с десяток лет, после чего темпы начали понемногу падать и пришли к тому относительно медленному движению, которое наблюдается сегодня.

Среди колоссального количества идей, выдвинутых в то время, особое место, отличное от других, принадлежит теории относительности, специальной и общей. Она была рождена в XX веке как дитя интеллекта одной возвышающейся над всеми личности. Это — совершенно новый набор концепций, в рамках которых находят объединение механика, электродинамика и гравитация. Они принесли с собой новое восприятие таких понятий, как пространство и время. Эта совокупность идей в каком-то смысле является вершиной и синтезом физики XIX века. Они органически связаны с классическими традициями.

Квантовая теория в свою очередь характерна именно разрывом с классикой. Это был шаг в неизведанное, в мир явлений, которые не вмещались в рамки идей физики XIX века. Надо было создать новые пути постановки задач, новые способы мышления для того, чтобы понять мир атомов и молекул с его дискретными энергетическими состояниями и характерными особенностями спектров и химических связей.

Такие новые способы мышления были указаны и перенесены на язык уравнений в середине третьего десятилетия этого века. Дуальность волны и частицы была предложена де Броилем в 1924 г., уравнение для частиц-волны было написано Шрёдингером в 1925 г. В эти же годы основные концепции квантовой механики были сформулированы и критически проанализированы в Копенгагене под руководством Нильса Бора, с помощью идей Гейзенberга, Крамерса, Паули и Борна. Вряд ли еще успели про-

сохнуть чернила на рукописях этих статей как новый способ трактовки явлений природы был успешно применен к объяснению почти всех атомных явлений, которые с момента их открытия являлись для физиков загадкой. Правила квантования Бора и Зоммерфельда, которые казались весьма произвольными в тот момент, когда они были предложены, выступили здесь как логические следствия квантовой механики. Атомная спектроскопия стала дедуктивной наукой. Полуземпирический *Aufbauprinzip* *), выдвинутый Нильсом Бором, логически вытекал из квантовой механики с помощью принципа Паули. Удалось легко объяснить периодическую систему элементов Менделеева. Несколько годами позже была понята природа химической связи как квантовомеханического явления. Удалось объяснить строение металлов и кристаллов. Перефразируя известное высказывание Черчилля, можно сказать об этой золотой эре в истории физики: «Никогда ранее столь малым числом людей не было сделано столь многое в такой короткий промежуток времени».

Разрешите напомнить три характерные особенности, которые привнесла квантовая механика в наше понимание атомного мира. Во-первых, она ввела характерные длину и энергию, которые определяют атомные явления. Таким образом эти явления были снабжены шкалой размеров и мерой энергии. Сочетание электростатического притяжения между ядром и электроном, с одной стороны, и типичной квантовой кинетической энергией связанного электрона, с другой, определяют длину — боровский радиус и энергию — постоянную Ридберга. Размер атомов определяется длиной, которая получается из комбинации h^2/me^2 фундаментальных констант: единичного заряда e , массы электрона m и кванта действия h . Постоянная Ридберга равна другой комбинации me^4/h^2 . Таким образом определяются и объясняются атомные размеры и энергии.

Во-вторых, квантовая механика вводит характерность черт, отсутствовавшую ранее в физике. Волновые функции электронов описывают специальные виды состояний с простой симметрией, характеризующей симметрию той ситуации, в которой оказывается электрон в притягивающем поле ядра и других электронов. Структура этих состояний определяется теми фундаментальными формами, которыми задаются все окружающие нас тела. Эти формы непосредственно следуют из вида того силового поля, которое связывает электроны. Именно в этом пункте квантовая механика создала концепцию идеальной тождественности. Два атома или находятся в одном и том же квантовом состоянии и тогда они тождественны или находятся в разных состояниях — тогда они абсолютно нетождественны. Непрерывный переход между тождественным, почти тождественным и различным исчез.

И, наконец, третья черта состоит в использовании квантовых чисел для характеристики квантовых состояний. Качество сводится к количеству: число электронов и квантовые числа данного состояния полностью задают все свойства атома в этом состоянии. Здесь возрождены идеи Пифагора: спектр частот атома описывает характерный ряд величин, как бы типичную гамму этого атома. «Гармония сфер» возрождается в мире атомов. Идея Кеплера о простых геометрических и числовых соответствиях размеров орбит планет в Солнечной системе оказались неверными, но они проявились у электронных орбит в атомах в виде непосредственного следствия квантовой механики.

Фундаментальная проблема натуралистики была решена в результате открытия законов, которые приводят к характерным размерам и строго определенным совокупностям. Ясно, что в соответствии с нашим

*) Принцип заполнения электронной оболочки атома. (Прим. перев.)

опытом Природа построена именно из таких основополагающих блоков. Вещества обладают характерными свойствами, железо остается железом после испарения и затем конденсации. Ранее специфические свойства вещества были предметом изучения химии, а не физики. Квантовая механика объясняет эти свойства и потому исключает химию как отдельную науку.

Бесконечно разнообразные, но четко определенные пути, которыми атомы собираются в более крупные объекты, могут быть теперь рационально интерпретированы в квантовомеханических терминах. Создана теория молекулярной связи, в которой за счет характерного расположения электронов атомные ядра удерживаются вместе в правильном порядке. Поскольку здесь вновь приходится сталкиваться со взаимодействием зарядов ядер и электронов, размеры и энергии при этом должны быть того же порядка, что и в атомах. Отсюда вытекает, что межатомные расстояния — порядка нескольких боровских радиусов, а энергии связи — порядка электрон-вольт. Атомы состоят из частиц двух сортов, тяжелых ядер и легких электронов, которые связаны друг с другом взаимным притяжением. Межатомные расстояния определяются размером электронного облака. Соответствующую длину можно рассматривать как амплитуду нулевых колебаний электрона. Вследствие значительно большей массы ядер такие же колебания ядер в молекуле намного меньше (их отношение равно квадратному корню из отношения масс). Следовательно, ядра образуют достаточно хорошо локализованную структуру в молекулах и твердых телах. Именно этот факт привносит в химию и в науки о строении вещества структурные черты (вместе со всеми их архитектоническими следствиями). Квантовомеханическое описание свойств атомов приводит к пониманию всех этих характеристик вещества, а также тех постоянных, о которых собрано столько эмпирической информации в классической физике. В принципе, все эти постоянные, о которых мы уже упоминали выше, можно вычислить, выразив их через фундаментальные постоянные e , m , \hbar и массы ядер.

Строго определенная структура, образованная ядрами в молекулах, имеет особо большое значение для макромолекул, которые представляют собой длинные цепочки из молекулярных групп. Огромное число способов упорядочения в этих группах, каждый из которых приводит к совершенно определенному и достаточно стабильному состоянию, отражается в многообразии видов живых организмов в нашей флоре и фауне вследствие тонких процессов повторения и воспроизведения, которые удалось обнаружить за последнее десятилетие. Итак, химия, науки о строении вещества и молекулярная биология неразрывно связаны с квантовой механикой электронов в кулоновском поле атомных ядер. Основные структуры обладают ограниченной стабильностью, измеряемой долями характерной единицы энергии — постоянной Ридберга. Воздействия с энергией в несколько электрон-вольт разрушают их. Таков этот чувствительный мир химии и биологии, который не может существовать при температурах выше нескольких электрон-вольт. А ведь именно такие температуры встречаются в большинстве звезд. Вещество в том виде, в котором мы привыкли видеть его, представляет собой очень редкое явление во Вселенной.

Слабое излучение радия в опытах Кюри явилось первым указанием на существование других явлений в веществе. Вскоре из анализа процесса радиоактивности стало очевидным, что должны существовать энергии, много большие энергий, ответственных за строение атома и измеряемых единицами постоянной Ридберга. Резерфорд использовал эти энергии для того, чтобы раскрыть строение атомов. По аномальному рассеянию

α -лучей в атомах он обнаружил атомное ядро. Сколько это ни покажется невероятным, но только лишь шесть лет спустя (1917 г.) он использовал тот же метод для изучения строения ядер и обнаружил, что некоторые из составляющих ядра должны быть протонами. Так был открыт новый мир явлений природы. Однако полностью строение ядра было раскрыто только пятнадцать лет спустя в великий для физики год — 1932 г. В этом году Чедвик обнаружил нейтрон, Ферми опубликовал свою теорию радиоактивного β -распада, а Андерсон и Неддермайер открыли позитрон. Каждое из этих трех открытий привело к далеко ведущим исследованиям.

Существование позитрона подтвердило справедливость и глубину релятивистского волнового уравнения Дирака (1927 г.), одного из наиболее замечательных примеров мощи математического мышления. Это уравнение — дитя от брака квантовой механики с теорией относительности — продемонстрировало необходимость наличия у электрона спина и характерного магнитного момента. Помимо этого, оно явным образом отражает фундаментальную симметрию, соответствующую наличию двух типов материи — вещества и антивещества — с одинаковыми свойствами, но противоположными зарядами и другими характерными квантовыми числами.

Открытие нейтрона в качестве составной части ядра показало существование нового типа сил в природе. Оно определенно указывало на сильный эффект не электромагнитного происхождения, который удерживает нейтроны и протоны тесно связанными в ядре. Было обнаружено проявление чего-то нового, новой силы в природе, не имеющей аналога в макроскопической физике. Так были открыты сильные взаимодействия.

Фермиевская теория β -распада продемонстрировала наличие другого взаимодействия между элементарными частицами. Нейтрон может превращаться в протон с испусканием лептонной пары — электрона и нейтрино. Это — так называемое слабое взаимодействие, которое является четвертым взаимодействием помимо гравитационного, электромагнитного и сильного взаимодействий. Оно настолько слабо, что временная шкала для таких процессов включает времена порядка секунд, дней или лет.

Таким образом, 1932 г. ознаменовал начало физики нового типа, имеющей дело со строением ядра и его составляющих и исследующей дотоле не известные силы и взаимодействия.

Вернемся теперь к силам, действующим между нейтроном и протоном. Эксперименты по рассеянию частиц помогли познать довольно сложный характер этих сил. Они короткодействующие и притягивающие, за исключением очень малых расстояний, меньше, чем один ферми, где они становятся отталкивательными. Они также сильно зависят от относительной ориентации спинов двух частиц и от симметрии волновой функции. В этом отношении, так же как и в отношении отталкивательного характера на малых расстояниях, они напоминают химические силы между двумя атомами. К этой аналогии мы еще вернемся позже.

Для оценки силы притяжения давайте сравним ее с электростатическим притяжением, которое должно было бы существовать между нейтроном и протоном, если бы они имели противоположные электрические заряды g и $-g$. Оказывается, что ядерное притяжение, грубо говоря эквивалентно электростатическому притяжению между двумя противоположными зарядами величины $g \sim 3e$. Эта информация позволяет оценить примерные размеры и энергию простейших ядерных систем, применив те же квантовомеханические принципы, которые мы использовали выше в случае атомов. Для этого просто надо взять выражения для боровского радиуса и постоянной Ридберга и заменить в них e на g , а массу электрона

на массу ядра. Тогда получим боровский радиус ядра равным \hbar^2/mg^2 , т. е. около $2 \cdot 10^{-13}$ см, и ядерную постоянную Ридберга mg^4/\hbar^2 равной примерно 3 Мэв. Ядерные системы приблизительно в 10^{-5} раз меньше, чем атомные системы, а соответствующие энергии лежат в области миллионов электрон-вольт.

Как только ядерные силы выяснены, можно применить квантовую механику к ядру как к системе из нейтронов и протонов. В ядерной физике мы вновь сталкиваемся с законами атомной квантовой механики, повторенными, однако, в другой шкале единиц. Спектры ядерных энергетических уровней обладают структурой, подобной структуре атомных спектров с теми же квантовыми числами. Но появляется одно новое важное квантовое число — изотопический спин. Оно обязано своим появлением тому, что ядерные силы не отличают нейтронов от протонов, так что приходится рассматривать эти две частицы как эквивалентные состояния одной и той же частицы — нуклона. Формально аналогичная ситуация имеет место для двух спиновых состояний фермиона. Эта аналогия навела Гейзенберга на мысль ввести важное понятие изотопического спина и соответствующие квантовые числа.

За счет слабых взаимодействий нейтрон может переходить в протон и обратно, так что аналогия со спином имеет также и динамическую основу. Вследствие этого ядерная система не представляет собой нерушимое целое с заданными числами нейтронов и протонов по отдельности. Фиксировано только полное число A нуклонов. Все ядра с одинаковыми значениями A принадлежат к одной и той же квантовой системе и потому существует приблизительная вырожденность (и другие типичные соотношения) квантовых состояний ядер с равными A , но отличающихся лишь заменой некоторых нейтронов на протоны.

Существует много схожих черт в строениях атомов и ядер. Одно из них — периодичность свойств в функции от атомного номера A , возникающая вследствие подобной оболочечной структуры. Числа заполнения, которые характеризуют заполненные оболочки, слегка отличаются из-за разницы в природе эффективного потенциала и из-за той важной роли, которую играет в ядрах спин-орбитальная связь. Роль благородных газов, характеризующихся высокой стабильностью и малыми скоростями химических реакций, играют в ядерной физике те ядра, у которых полностью заполнены оболочки.

Аналогия между атомами и ядрами, возможно, не полностью оправдана. Может быть, более правильным было бы сравнение ядер с молекулами. При этом нуклоны ядра надо сопоставить скорее атомам молекулы, нежели ядрам. Почему? Силы, действующие между нуклонами, довольно сложны как по их зависимости от расстояния, так и по другим свойствам. Эти силы более похожи на химические силы между атомами с их отталкиванием на малых расстояниях, минимумом потенциала в промежутке и зависимостью от симметрии волновой функции. Заманчиво предположение о том, что по аналогии с химическими силами ядерные силы не являются фундаментальными (как, например, электростатическое притяжение), а могут представлять собой вторичный эффект более существенного явления, кроющегося в недрах нуклона. Может быть, это — проявление чего-то значительно более мощного и простого, как, например, химические силы служат отражением кулоновского притяжения между электронами и ядрами внутри атома.

Современная физика элементарных частиц представила множество доказательств внутренней структуры нуклона, но пока еще не сумела интерпретировать их. Наиболее важным свидетельством сложного строения нуклона служит тот факт, что нуклон, кажется, меняет свое состояние

при бомбардировке его потоками частиц высоких энергий. Он может перейти во множество возбужденных квантовых состояний. Эти состояния образуют спектр уровней, который отражает существование третьей спектроскопии. В этой спектроскопии энергии возбуждения измеряются в гигаэлектрон-вольтах, а не в мегаэлектрон-вольтах, как в ядрах, или в электрон-вольтах, как в атомах. Этот спектр уровней обнаруживает регулярность в поведении, подобную регулярностям в других спектрах. Рассматриваются такие же квантовые числа, за исключением нового квантового числа, введенного Гелл-Манном и Ниниджимой, — гиперзаряда или странности. Вновь переходы между состояниями сопровождаются излучением или поглощением квантов света или лептонных пар. Однако обнаружен и новый вид обмена энергией — поглощение или испускание мезонов. Расшифровка внутренней структуры нуклона является одной из наиболее существенных задач современной физики.

Наличие возбужденных состояний у нуклона с определенностью указывает на некоторую внутреннюю динамику. Известный в настоящее время спектр этих состояний обладает рядом регулярных свойств, которые непосредственно связаны со свойствами системы, состоящей из частиц трех сортов с полуцелым спином, называемых иногда «кварками» или «стратонами». Кроме того, регулярности в спектре мезонов (которые согласно наблюдениям также появляются во многих квантовых состояниях, образующих целый спектр) указывают на то, что мезоны образованы из пары, состоящей из кварка и его античастицы. В этой гипотетической картине мезоны являются квантовыми состояниями системы из кварка и антикварка по аналогии с позитронием, представляющим собой систему из электрона и позитрона. Вопрос о внутренней структуре электрона даже еще не пытаются решать. Наиболее озадачивающим обстоятельством в этой проблеме является факт существования тяжелого электрона или мюона, частицы, которая, как кажется, во всех отношениях идентична с электроном, за исключением того, что она тяжелее электрона в 200 раз. Может быть, четыре известных лептона — электрон, мюон и два типа пейтрито — образуют начальную ступень более сложного лептонного спектра. Хотя сегодня электромагнитные взаимодействия электрона исключительно хорошо описываются почти совершенной теорией квантовой электродинамики, все еще остаются основополагающие проблемы относительно природы электрона, а именно: причина очевидной универсальности элементарного заряда, существование тяжелого электрона, происхождение массы электрона и последняя, но не менее важная, проблема природы слабых взаимодействий с их загадочными нарушениями установленных симметрий, таких, как симметрии правого и левого вещества и анти вещества.

Современная физика элементарных частиц выдвигает много озадачивающих проблем, связанных с пониманием многочисленных неожиданных явлений, которые обнаруживаются в эксперименте. Теоретическое понимание все еще не продвинулось достаточно далеко, хотя физики-теоретики выдвинули большое число идей, моделей и аналогий для того, чтобы скоррелировать и систематизировать богатый экспериментальный материал. В физике элементарных частиц нет сейчас своего Резерфорда, не появился еще и ее Нильс Бор. Отсутствие решающего успеха отнюдь не связано с недостатком интеллектуальных усилий. Но пока еще не достигнуто понимания тех процессов, которые происходят внутри так называемых элементарных частиц. (Еще раз перефразируя высказывание Черчилля, можно заметить: «Никогда ранее столь много людей не сделали столь мало за такой большой срок».) Однако цену отдельных достижений следует определять, соизмеряя ее с величием изучаемой проблемы. Разре-

шиле привести любимую Нильсом Бором историю об английском лорде, рассказывающем о своих подвигах при охоте на львов. Когда одна из слушательниц, молодая девушка, спросила его, скольких же львов он убил, то ответ был: «Ни одного». На это девушка заметила: «Разве это не слишком мало?». Ответ лорда был: «Только, когда речь идет не о львах.»

Итак, мы вкратце упомянули пока только о развитии нашего знания о структуре вещества в XX веке, начиная с атомной физики и кончая современной физикой элементарных частиц. Но наука развивается не только в этом «интенсивном» направлении познания все меньших объектов, более высоких энергий, явлений и законов, которые все более глубоко запрятаны в фундаментальных составляющих вещества. Существует также «экстенсивное» направление исследований, на котором наше знание основных законов и свойств вещества применяется с целью более широкого практического использования.

Современная физика твердого тела может дать детальное описание поведения металлов, полупроводников и кристаллов всех типов. В частности, поведение твердых тел при очень низких температурах связано с такими явлениями, как сверхпроводимость, которую долгое время не удавалось объяснить. Однако это явление можно понять и вывести его законы из тех же общих основных предположений о квантовой природе атомной динамики. Таким же способом описывается и явление сверхтекучести некоторых жидкостей при низких температурах. Однако понадобилось немало времени, прежде чем были найдены адекватные понятия, с помощью которых удалось описать основные черты квантового поведения систем из многих частиц. Как только такие понятия были выработаны, они помогли попытать не только странное поведение ряда веществ при низких температурах, но и некоторые характерные особенности в поведении тяжелых ядер. Эти концепции помогли также выяснить ряд проблем квантовой электродинамики и других теорий. Применимость новых понятий во многих областях физики является одним из наиболее благодарных аспектов этих достижений, подчеркивающим единство физики.

Новая вакуумная техника, микроволновые приборы и сильные магнитные поля позволили приступить к изучению плазмы, формы вещества при высоких температурах и низких давлениях, когда большинство электронов уже не находится на своих атомных квантовых орбитах. Это состояние вещества наиболее широко распространено во Вселенной, внутри звезд и в межзвездном пространстве. Поведение плазменного состояния диктуется очень простыми законами — электромагнитным взаимодействием между ядрами и электронами. Квантовые эффекты пренебрежимо малы вследствие высокой степени возбуждения. Таким образом, мы имеем здесь дело с классической физикой электронов и ядер, которая, к нашему удивлению, оказывается более сложной, чем квантовая физика, из-за нелинейных эффектов и нестабильностей разных типов.

Обзор физики XX века был бы неполным без упоминания об астрофизике. Эта наука зародилась в данном столетии и представляет собой передовой фронт физики в изучении самых больших расстояний, в отличие от физики элементарных частиц, занимающейся исследованием явлений, происходящих на исключительно малых расстояниях. Имеются достаточно веские основания для того, чтобы считать, что эти две области физики очень тесно связаны. Два факта послужили основой для формирования этой области науки. Во-первых, признание роли ядерных реакций как источника энергии звезд, и, во-вторых, открытие расширения Вселенной. Первое открытие показало, что ядерные реакции во много раз более важны при излучении энергии звездами, чем обычные химические реакции. Однако ядерные процессы не протекают в естественных

земных условиях, за исключением лишь немногих радиоактивных элементов, являющихся последними остатками «золы» после того колоссального взрыва сверхновой, который привел к последующему формированию окружающего нас мира. Поэтому, чтобы изучать ядерные процессы, нам приходится воспроизводить их в лабораториях. Во Вселенной они в громадных масштабах протекают внутри звезд и при больших взрывах звезд. Поэтому отнюдь нельзя считать обыденными те достижения человека, когда он смог повторить на земле процессы, которые в естественных условиях протекают только в центре звезд, и использовать их, хотя некоторые из этих применений повлекли за собой большие разрушения.

Второе открытие, расширение Вселенной, является весьма таинственным и имеет фундаментальное значение. Появляется новая пространственно-временная шкала. Это — время, за которое Вселенная расширилась до ее современного состояния, интервал, равный примерно 10^{10} лет. Мы еще очень далеки от понимания того, на что была похожа Вселенная в начале этого пути, но мы уверены в одном: вещества, образующее теперешнюю Вселенную, в то время было в совершенно другом состоянии. Временной интервал определяет и соответствующую длину (расстояние, которое свет проходит за такой промежуток времени). Она равна радиусу Вселенной в данный момент, т. е. расстоянию, из-за которого к нам не может прийти никакой информации. Она определяет максимальный размер — около 10^{10} световых лет, в который заключен наш мир.

ХХ век для изучения Вселенной означает то же, что XVI век для изучения Земли, когда Магеллан проплыл вокруг земного шара и показал, что Земля ограничена. В этом столетии мы узнали, что Вселенная, с которой мы можем вступить в контакт, конечна. Более того, мы почти измерили ее глубину при наблюдениях звездных объектов с красным смещением порядка единицы.

Современная астрофизика привнесла новые аспекты в физику — историческую перспективу. Ранее физика была наукой о состоянии вещества в данный момент. Астрофизика имеет дело с развитием звезд и галактик, с формированием элементов, с расширяющейся Вселенной. В истории этого развития имеется множество нерешенных вопросов, много явлений (например, изучение квазаров), которые еще не объяснены, но часть этой истории уже достаточно хорошо понята. К ней относятся те моменты, когда звезды образовывались из водородного облака, элементы образовывались путем синтеза из водорода, звезды эволюционировали, проходя через различные стадии своего развития — некоторые из них кончали свое развитие в виде холодных кусков твердого вещества, другие кончали свою историю колоссальными взрывами (которые мы наблюдаем в виде сверхновых), оставляя иногда вместо себя быстро вращающиеся нейтронные звезды. Один из таких взрывов произошел в 1054 г. В результате образовался знаменитый «Краб», в котором мы наблюдаем расширяющиеся продукты взрыва с пульсаром в центре.

Кинетическая энергия, выделяющаяся при сжатии больших звезд после того как их ядерное горючее иссякло, такова, что отдельные протоны получают энергии порядка гигаэлектрон-вольт, т. е. энергии порядка их массы покоя. Поэтому на этой ступени развития важна физика высоких энергий и все недавно открытые явления возбуждения нуклонов и рождения мезонов будут иметь место в огромных масштабах так же, как ядерные реакции протекают в громадных областях в центре обычных звезд. Возможно, весьма важно то, что такие энергии достигаются, когда гравитационная энергия частицы становится порядка ее массы. Это — так называемый предел Шварцшильда, при котором гравитационное поле становится критически большим и сжимает локальное простран-

ство так, что свет не может выйти из него. Все это верно, если наши современные идеи о гравитации еще применимы к таким необычным условиям. Таким способом может проявиться связь между физикой высоких энергий и гравитационными явлениями.

Космологические аспекты поведения вещества обнаруживают, что квантовая физика электрона не играет большой роли во Вселенной. Лишь изредка вещество находится в таком состоянии, когда существенны квантовые свойства электронов, вращающихся вокруг ядер. В большинстве случаев вещество или слишком горячее, или же чрезчур разреженное. Но именно в тех специальных условиях, когда могут образовываться квантовые орбиты, природа формирует атомы, комбинации их, макромолекулы и живые организмы. И как раз при этом происходит величайшее событие во Вселенной, когда Природа в форме человека начинает познавать сама себя.
