

Роль физики элементарных частиц в развитии современного естествознания⁴²

Нет необходимости говорить о том, что физика элементарных частиц играет в современной науке очень важную роль. Свидетельством тому — и большое количество физиков, занятых исследованиями в данной области, и огромные бюджеты национальных и международных учреждений, предоставляющих испытательные установки для физических исследований. В сегодняшнем докладе я поэтому ставлю перед собой следующие цели: подробнее проанализировать эту роль; проследить конкретные связи между физикой частиц и другими ветвями физики или другими науками; выяснить причины и следствия появления данной сферы деятельности в рамках так называемой большой науки; наконец, бросить взгляд на результаты, достигнутые за последние десятилетия, и сделать из них выводы, касающиеся понятийной структуры нашей науки.

Когда в начале нашего столетия работы Резерфорда и Бора впервые позволили заглянуть в строение атома, было нетрудно догадаться, что достижение понимания электронных оболочек атома будет иметь крайне важные последствия для многих областей физики и для науки вообще. Выявились основы, на базе которых удалось объяснить поведение материи в ее различных формах (твердое тело, жидкость, газ), осмыслить такие специфические свойства, как кристалличность, электропроводность, упругость твердых тел или сверхтекучесть жидкостей, и дедуцировать цвет газов в разрядных трубках из траекторий электронов внутри атома. Обширный материал, собранный химиками в процессе изучения молекул, свойств химических соединений и механизмов их реакций, ожидал анализа и интерпретации в свете этих новых знаний об атоме. На повестке дня стояло их широкое практическое применение, и действительно, после 1930 года, когда мы поняли поведение

* © Die Rolle der Elementarteilchenphysik in der gegenwärtigen Entwicklung der Naturwissenschaft. R. Piper und Co., Verlag, München 1977.

внешних частей атома, эти познания принесли богатые плоды в физике твердого тела, при исследовании низких температур и в астрофизике.

Первые шаги ядерной физики не сопровождались подобными ожиданиями. В большинстве своих проявлений — если не считать радиоактивности — ядро атома предстает неизменной единицей, и даже в середине 30-х годов многие сомневались в возможностях технического применения ядерной физики. Лишь когда Вейцзеккер и Бёте доказали, что звезды — это гигантские атомные печи, а Отто Ган открыл расщепление урана⁴³, расчистился путь для последовавшего затем невероятно ускоренного технического развития.

Можно ли ожидать аналогичных последствий в случае физики элементарных частиц? По причинам, относящимся к истории науки, мы пользуемся термином «элементарные частицы» — насколько вообще им пользуемся — применительно к объектам с барионным числом 1 или 0, с зарядом 1 или 0 и с лептонным числом 1 или 0⁴⁴; поведение именно этих частиц всесторонне исследовалось за последние 20 лет. В большинстве природных феноменов эти частицы выступают, подобно ядру, как неизменные единицы, и лишь с помощью гигантских ускорителей мы можем деформировать их, превратив в весьма нестабильные объекты, которые распадаются в конце концов на небольшое число стабильных объектов, известных нам как электроны, протоны, фотоны и нейтрино. Диапазон их технического применения кажется небольшим. Естественно, мы в состоянии комбинировать эти объекты друг с другом, получая более крупные соединения, вызывать таким путем реакции, добывать энергию, однако все эти процессы уже хорошо известны в ядерной или атомной физике.

Прежде всего поставим вопрос о том, какие взаимосвязи существуют между основательным изучением физики элементарных частиц и другими отраслями нашей науки. Эксперименты двух последних десятилетий привели к созданию довольно-таки непротиворечивой картины мира элементарных частиц. Когда на большом ускорителе сталкиваются две частицы очень высоких энергий, результат их столкновения не следовало бы называть делением столкнувшихся частиц. В действительности тут происходит рождение новых (большей частью нестабильных) частиц из кинетической энергии сталкивающихся объектов согласно законам специальной теории относительности. Энергия превращается в материю, принимая форму частиц.

Спектр частиц, которые здесь могут возникнуть, столь же сложен, как спектр стационарных состояний атомов, молекул или ядер. Частицы, точно так же, как атомы или молекулы, характеризуются квантовыми числами, иначе говоря, характеризуются своей симметрией, своим поведением при фундаментальных преобразованиях. Поэтому область физики частиц уместно сравнить с областью химических реакций в газах. И там, и здесь требуется знание об очень многих отдельных объектах — в одном случае о молекулах, в другом о частицах — и о том, какая реакция происходит при их столкновении. За последние 20 лет собрано множество данных об элементарных частицах; попробуем осмыслить значимость этих данных для других областей науки.

Начнем с теоретической стороны картины. Как методы, так и результаты здесь потенциально важны для других научных областей. Методы анализа процессов, наблюдаемых в физике частиц, аналогичны методам, применяемым при изучении реакций между атомами, молекулами или электронами, скажем, в квантовой химии. Методы эти принадлежат к теоретической области, которую называют физикой многих тел, и каждый успех, достигаемый в физике частиц, может оказаться полезным в данной области, например при изучении химических реакций или при исследовании поведения твердых тел в возбужденных состояниях. И наоборот: эти возбужденные состояния, именуемые поляронами или экситонами, являются в нерелятивистской теории поля наилучший аналог процессов, которыми занята физика частиц. Между двумя этими областями происходит поэтому плодотворный обмен идеями⁴⁵.

Что касается результатов, то важнейших приложений наших познаний физики частиц следует, по-видимому, ожидать в области ядерной физики. Силы взаимодействия между протоном и нейtronом как составными частями ядра пока еще недостаточно изучены. Существуют феноменологические описания этих сил, в какой-то мере соответствующие расчетам стационарных состояний ядер; но уже определить силы взаимодействия между тремя телами удается лишь с гораздо меньшей точностью. Эти силы, по-видимому, в значительной степени возникают вследствие обмена частицами, прежде всего бозонами (π -мезонами, ρ -мезонами и т. д.)⁴⁶, так что изучение частиц и их взаимодействия расширяет наше знание внутриядерных сил.

В этой связи представляется вероятным будущее влия-

ние физики частиц на астрофизику. Как известно, новейшие наблюдения показали, что существуют звезды чрезвычайно высокой плотности, вещества которых на величину порядка 10^{15} плотнее материи в ее нормальном состоянии. Эти звезды, так называемые пульсары или нейтронные звезды, состоят, по-видимому, из нейтральной ядерной материи. Взаимодействия, обусловливающие физические свойства материи таких звезд, должны быть аналогичны взаимодействиям внутри атомных ядер, если отвлечься от гравитации, которая играет решающую роль внутри звезд, но не внутри ядер. У звезд с массой, значительно превышающей массу Солнца, следует ожидать более сильного сжатия вследствие гравитации, а это значит, что ядерная физика не может дать никакой информации о внутренней структуре материи такой плотности. Но если полностью прояснятся законы природы, на которых основывается существование элементарных частиц, то знание этих законов предоставит, возможно, достаточную информацию об условиях внутри таких астрофизических объектов, включая и знаменитые черные дыры.

Итак, физика частиц имеет интересные области применения в физике твердого тела, в ядерной физике и в астрофизике, и все же применений этих недостаточно, чтобы объяснить огромный интерес людей к физике частиц и затрачиваемые на нее огромные усилия. Как раз в последние годы поднят вопрос о том, не могут ли законы природы, с помощью которых интерпретируется поведение частиц, служить универсальной базой для всех ветвей физики, т. е. не идет ли здесь речь о фундаментальном законе. Собственно говоря, атомная физика, или учение об атоме, с самого начала ставила себе целью выявление фундаментальных законов, которые позволили бы достичь понимания природы. К данному аспекту проблемы я хотел бы вернуться в последней части своего доклада, а пока остановлюсь на грандиозной экспериментальной и технической работе в области физики элементарных частиц.

С экспериментальной точки зрения физика частиц есть естественное продолжение или расширение физики атома и физики ядра. На другие части атома, на его электронные оболочки, стоявшие в центре внимания физиков в начале 20-х годов, можно воздействовать с помощью незначительных сил. Электрические и магнитные поля позволяли вызвать изменения, зеркально отражавшиеся в спектре атомов. Электроны, ускоренные в разрядной трубке при напряжении в несколько вольт, могли приводить атом в

возбужденное состояние, и излучавшийся таким атомом свет предоставлял ученому ценную информацию о динамической структуре оболочки. Соответственно тогдашние опыты проводились в небольших лабораториях с помощью оборудования, крайне дешевого в сравнении с инструментарием современных исследовательских институтов. Изучение атомного ядра с помощью такого оборудования оказалось невозможным. Чтобы привести ядро в возбужденное состояние, необходима энергия, примерно в миллион раз большая, чем та, которая используется для возбуждения электронных оболочек.

Поэтому Кокрофт и Уолтон сконструировали высоковольтную установку, или каскадный генератор, Лоуренс⁴⁷ построил циклотрон, и с помощью протонов, ускорявшихся под напряжением порядка миллиона вольт, удалось приводить атомные ядра в возбужденное состояние, превращать их в другие ядра и образовывать из них многие новые, нестабильные радиоактивные ядра. Параллельно изобретались новые инструменты для фиксирования фрагментов ядра — разнообразные счетчики, камеры Вильсона, автоматически начинавшие действовать в начале процесса; разрабатывались новые методики замера столкновений. Таким путем ядерная физика стала важной отраслью науки в 30-е годы еще прежде того, как Отто Ган открыл расщепление урана, проторив дорогу неслыханному техническому развитию. Практические применения и их политические последствия смогли теперь, по крайней мере задним числом, послужить оправданием для крупных ассигнований, в которых нуждались ядерные исследования. Нет ничего удивительного в том, что ассигнования на ядерные исследования в США за годы войны возросли до миллиардов долларов и отношение общества к современной технологии радикально изменилось. Оставалась, правда, еще третья ступень, которую физики предвидели еще до войны.

В космическом излучении иногда обнаруживаются частицы с энергией, в тысячу и более раз превышающей энергию, потребные для превращения ядра. Столкновение подобных частиц могло привести к превращению или расщеплению даже тех объектов, которые считались элементарными частицами, последними неделимыми единицами материи, а именно протонов и электронов. Теоретические соображения позволяли предположить, что при столкновении двух элементарных частиц очень высоких энергий могут возникнуть новые частицы, а при известных обстоятельствах множество частиц, причем подобные процессы

не следует рассматривать как деление, расщепление или возбуждение частиц; здесь надо говорить о превращении энергии в материю. В предвоенных экспериментах с космическим излучением были получены некоторые результаты, ориентировавшие мысль ученых в этом направлении, но ни один эксперимент не дал недвусмысленных свидетельств в пользу возможности образования многих частиц.

В послевоенное время физики рассмотрели поэтому возможность постройки гигантских ускорителей в целях систематического исследования названных процессов. Для осуществления подобных планов требовались такие технические усилия и такие ассигнования, которые выходили далеко за рамки всего того, что запрашивалось ранее для финансирования фундаментальных исследований. Но, с одной стороны, американское правительство привыкло за годы войны ассигновывать очень большие суммы на ядерное исследование, а с другой — проблема мельчайших единиц материи представлялась столь важной и столь захватывающей, что работы в данной области начались без промедления. Известно, что в последующие два десятилетия строились все более крупные ускорители. Первым был космotron в Брукхейвене с энергией ускоренных протонов на 3 ГэВ, затем вступили в строй беватрон в Беркли на 6 и новый ускоритель в Брукхейвене на 30 ГэВ, а также ускоритель Европейского центра ядерных исследований в Женеве; к ним присоединились русские машины в Дубне на 10 и в Серпухове на 70 ГэВ⁴⁸. В настоящее время наибольшие энергии достигаются на ускорителе «Батавия» и на накопительных кольцах в Женеве. Не берусь описывать почти невероятную точность и надежность, необходимую для обеспечения функционирования подобных установок, а также громадные технические мощности, потребные для их постройки. Можно только удивляться подвигу инженеров и физиков, решивших эти задачи.

По мере своего развития физика элементарных частиц стала составной частью того, что носит имя большой науки; и поскольку в нашем мире за все нужно платить, стиль экспериментальной физики в ходе этой экспансии поневоле должен был круто измениться. Признаться, перед лицом происшедших изменений я постоянно испытываю несколько беспокойное чувство, и мне поэтому хотелось бы подробнее разобраться в нем. Проблема не только в том, что стоимость большого ускорителя достигает миллиардов долларов и что его строительство растягивается на долгие годы. Для столь большого инженерного проекта тут

ничего необычного, и к изменению характера фундаментального исследования в физике это почти не имеет отношения. Подлинная проблема в том, что даже один-единственный эксперимент с таким ускорителем требует длительной фазы планирования, больших ассигнований и долгих лет работы большого количества участников. Лишь тогда есть шанс довести его до конца.

А теперь возвратимся ненадолго к прежним временам. Вспоминая об одном из ранних экспериментов лорда Резерфорда в Монреале в Университете Макгилла, Нильс Бор описал его следующим образом. Однажды, занятый исследованием поведения радиоактивных веществ, Резерфорд подумал, что при распаде радия должен возникать инертный газ, получивший позднее название радона, или эманации радия, и предположил, что удастся довести этот газ при очень низких температурах до жидкого состояния, сконцентрировать его таким путем и исследовать его свойства. Резерфорд заказал в Европе низкотемпературное оборудование, и, когда оно пришло морем в Монреаль, ни одному сотруднику института не было разрешено покидать здание до окончания эксперимента. Каждый был обязан помогать в монтаже установки, при подготовке счетчиков к работе и т. д., ассистентам велели работать всю ночь, и действительно, через 36 часов сжижение удалось, существование радона было доказано. Можете представить себе радость Резерфорда, когда он убедился, что его догадка верна, и удовлетворение ассистентов, сумевших ее непосредственно подтвердить.

Возьмем теперь для сравнения ситуацию в современной физике элементарных частиц. Семь лет назад один толковый молодой физик из нашего института нашел, что ускорительная установка одной из наших исследовательских групп в рамках ЦЕРН* обладает достаточными параметрами для замеров одной любопытной величины, соединения эта-мезонов с нуклонами. Важность этой величины объяснялась тем, что теоретики давали ей очень разную оценку, а потому она имела значение при выборе той или иной теоретической интерпретации. Докладной записке, составленной молодым физиком в октябре 1967 года, был дан ход, сам он вошел в состав исследовательской группы, и высказывалась надежда, что эксперимент удастся осуществить в течение года. Но прежде, как и полагается,

* CERN—Conseil Européen des recherches nucléaires, Европейский центр ядерных исследований.

надо было завершить другой эксперимент, начатый ранее.

Для этого эксперимента понадобилось гораздо больше времени, чем думали. Установка нуждалась в усовершенствовании, в монтаже новых счетчиков, без чего нельзя было положиться на надежность данных, и фактически прошло много лет, прежде чем эксперимент был завершен. Опыт, приобретенный за эти годы исследовательской группой, показывал, что для проведения предложенного молодым физиком нового эксперимента необходимо дальнейшее усовершенствование счетчиков. Сложилось мнение, что приступить к эксперименту немедленно было бы слишком рискованно. Более целесообразным признали пока видоизмененное продолжение прежнего эксперимента с целью испытания новой установки; этот план к тому же более соответствовал генеральной программе ЦЕРН. Расширенное повторение старого эксперимента опять-таки растянулось на несколько лет. В прошлом году предложение о новом эксперименте было подано наконец руководству ЦЕРН; существует определенная надежда, что в текущем году будет достигнуто положительное решение и эксперимент удастся провести в следующем году. Промежуток в восемь лет между возникновением идеи эксперимента и его завершением, пожалуй, превышает средний уровень, но шесть лет для большого ускорителя нужно, наверное, считать нормой. Само собой разумеется, что затраты времени на такого рода исследование вырастают для молодого и деятельного ученого в серьезнейшую проблему.

Другой проблемой является необходимость специализации. Проведение эксперимента на большом ускорителе требует разнообразнейшего оборудования, для создания и эксплуатации которого требуется каждый раз особый специалист. Физик, отвечающий за свой узел, полностью занят своей частью аппаратуры и почти не имеет времени задуматься об эксперименте и его цели, не говоря уже о теоретических вопросах физики частиц.

И наконец, решение об осуществлении или отвержении того или иного проекта никогда не принимается каким-то одним физиком. Поскольку за время доступа к одному из лучей ускорителя соперничают каждый раз несколько исследовательских групп, вопрос о приоритете вносится на разные комиссии. Но ведь идеи исходят от конкретных физиков, у комиссий идей нет. Ответственная комиссия всегда будет тяготеть к продолжению линии, зарекомендовавшей себя в прошлом, избегая новшеств и риска, связанного с новыми идеями.

Все это совершенно неизбежно, таковы непреложные последствия того факта, что физика элементарных частиц стала составной частью большой науки. Приходится мириться с создавшимся положением вещей. Но обо всем этом нам следовало бы помнить, когда мы, скажем, в качестве советников нашего правительства даем оценку бюджетных ассигнований на различные области науки. Организация научного исследования — важная задача в любом современном государстве, и видным физикам очень часто приходится давать советы своим правительствам в деле вынесения решений о приоритетах. Финансовые средства на постройку и эксплуатацию большого ускорителя сопоставимы со средствами, требующимися для основания и поддержания жизнедеятельности нового университета. Само собой разумеется поэтому, что, прежде чем выносить решение, надо взвесить многие факторы отчасти политического, отчасти научного свойства. Рассмотрю некоторые из них.

Прежде всего — интернациональный характер физики элементарных частиц. Вряд ли в какой-либо другой научной области международное сотрудничество было столь необходимым и столь успешным. Отсутствие прямого технического применения защищает эту область от примеси экономических или национальных интересов. Поэтому распределение высокой стоимости ускорительной лаборатории между целым рядом государств оказывается нетрудным делом, и научная жизнь в международном учреждении весьма способствует взаимопониманию между физиками, инженерами и управленческими служащими из разных стран. Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве представляется мне наиболее плодотворной международной организацией этого рода.

Подобная интернациональная лаборатория может одновременно действительно способствовать прогрессу в специальных областях науки и техники, стимулируя этот прогресс в каждой из стран-участниц. Экспериментирование в физике элементарных частиц невозможно без самой усовершенствованной технологии, и тем самым оно косвенно служит делу разработки этой технологии. Но не нужно только преувеличивать эту пользу, технический «побочный эффект» крупных ускорителей. Всякая отрасль «большой науки» даст аналогичный результат, только, может быть, в других областях техники; так что это не аргумент в пользу высокого приоритета физики частиц.

Тенденция к концентрации исследований физики час-

тиц в крупных международных центрах влечет за собой, конечно, свои неудобства, связанные с продолжительностью экспериментов. Сотрудничество между университетами и исследовательскими институтами стран-участниц, с одной стороны, и международным центром — с другой, в нормальном случае должно было бы предполагать, что физики или исследовательские группы того или иного из национальных институтов систематически приезжают в этот центр для работы в течение одного-двух лет, проводят там свой эксперимент и возвращаются в свой институт, обогащенные опытом и научно-техническими знаниями. Но поскольку для проведения эксперимента обычно требуется шесть и более лет, то ситуация оказывается значительно сложнее. Физик, проживший с семьей шесть лет при международном центре, как правило, не хочет возвращаться домой. Он чувствует себя как дома в своем новом окружении, его дети ходят там в школу, возможности для научной работы в центре лучше, чем в его старом университете. Современный уровень научной жизни центра поэтому часто не становится достоянием стран-участниц. Наоборот, страны-участницы нередко теряют своих одареннейших молодых ученых, уходящих в международный центр. Противодействовать такой утечке умов способна только высокая активность самих стран-участниц в деле развития физики частиц. В случае, когда национальный институт, располагающий пусть даже небольшим специализированным ускорителем, способствует повышению интереса к физике частиц, между этим институтом и международным центром начинается систематический обмен информацией, и зарубежные публикации института служат повышению престижа его страны. Однако подобный национальный институт опять-таки требует для себя обширных ассигнований.

Словом, в конечном счете мы опять возвращаемся к вопросу о том, действительно ли физика частиц является столь фундаментальной областью науки, что можно считать оправданными те большие материальные жертвы, которых она требует. О фундаментальном характере физики частиц я буду говорить в последнем разделе доклада; а сейчас я хочу рассмотреть лишь частный практический аспект проблемы, поставив вопрос: действительно ли мы получаем более фундаментальную, более существенную информацию, когда переходим ко все большим энергиям сталкивающихся частиц, то есть когда мы строим все более крупные ускорители? Почти всеми признается, что так

оно и должно быть. В прошлом переход к более высоким энергиям неизменно сопровождался раскрытием новых перспектив; почему же и в будущем не должно происходить то же самое? В заключение своего доклада я приведу некоторые аргументы в пользу того, что такой взгляд не обязательно верен. Впрочем, даже если этот взгляд будет разделяться всеми, экономические и социальные проблемы современного мира чрезвычайно затруднят финансирование намного более крупных ускорителей, чем те, которые строятся сейчас. Мы можем поэтому исходить из того, что в ближайшее десятилетие физика частиц будет вынуждена целиком опираться на существующие и строящиеся в настоящее время машины; процессы с наиболее высокими энергиями будут создавать на накопительных кольцах жевинского ускорителя. Если результаты новых экспериментов пробудят интерес к еще более высоким энергиям, то материалом для исследований может пока служить космическое излучение, как это было в начале 50-х годов. Подобные эксперименты, по всей видимости, обойдутся дешевле, чем постройка еще более крупных ускорителей, хотя результаты, возможно, окажутся не столь надежными⁴⁹.

Некоторые физики вопреки всем экономическим, политическим и социальным препятствиям выступают за более крупные ускорители, сравнивая эти машины как характерную черту современного мира с египетскими пирамидами или со средневековыми соборами. Они утверждают, что гигантские монументы прошлого были воздвигнуты с целью выразить глубочайшую суть жизни общества, символизировать его отношение к высшей силе. Основополагающее для всякого общества истолкование мира, говорят они, достигало здимого присутствия в виде величественного символа. Точно так же и крупные ускорители нашего времени могут считаться символами нашего научного истолкования мира.

Можно ли вполне согласиться с аргументацией подобного рода? Разумеется, есть свидетельства того, что в наше время человеческое доверие начинает сосредоточиваться именно на науке. В медицине, сельском хозяйстве, технических областях мы вверяем себя науке, с ее объективностью и строгостью. Но вместе с тем мы ощущаем чрезмерную узость научного истолкования мира. Здесь упущены многие существенные элементы, составлявшие главное содержание старых религий. Наука проходит мимо них столь решительно, что становится трудно даже говорить

о них. Но беспокойство молодого поколения и многочисленные другие признаки внутренней тревоги явно указывают на присутствие какого-то пробела, подлежащего заполнению. Я не могу поэтому убедить себя в том, что рядовой человек станет воспринимать ускорительную установку, которая выглядит снаружи как еще один завод, в качестве символа своего истолкования мира; впрочем, может быть, я ошибаюсь.

Наверное, мы должны оставить эти вопросы открытыми и подумать лучше о том, в каком смысле физика элементарных частиц может считаться фундаментальной областью научного исследования. Атомная физика с самого начала поставила перед собою цель проникнуть сквозь наблюдаемые феномены к лежащим в их основе фундаментальным структурам, к пониманию природы. Исторический путь науки вел от химии к модели атома Бора — Резерфорда, от этого образа атома — к гипотезе, что атомные ядра состоят из протонов и нейтронов, и к той идее, что вся материя состоит из трех элементарных частиц — протона, нейтрана и электрона, наконец — к описанию спектра частиц, могущих возникнуть при превращении энергии в материю. На этом пути встречались свои неожиданности, приведшие к существенным изменениям в системе физических понятий, и мимо этих изменений нельзя пройти при обсуждении вопроса о том, добрались ли мы в физике частиц до фундаментальных структур и каковы эти структуры.

Первой ошеломляющей неожиданностью было ограничение применимости ньютоновской механики. До открытия Планком кванта действия все механические процессы описывались в понятиях классической механики и всегда понимались в ее духе. Однако объяснить по этой теоретической схеме невероятную стабильность атома было невозможно. Атом, строение которого нарушено внешними силами химической реакции, столкновениями в разрядной трубке или электромагнитным полем, рано или поздно всегда возвращается к одному и тому же нормальному состоянию. Планетная система электронов, вращающихся вокруг ядра, не могла бы быть способна к такому поведению. Этот факт явился отправной точкой для гипотезы Бора о дискретных стационарных состояниях; благодаря этой гипотезе кант действия Планка вошел составной частью в механику. После того как квантовая механика получила математическое оформление, слово «состояние» стало означать нечто иное, чем в прежней классической

механике. В прежней физике реакция системы на действие внешних сил, например в процессе наблюдения, однозначно определялась тем, что называли состоянием этой системы. В квантовой механике знание состояния системы позволяло вычислить лишь вероятность ее реакции. Изменение состояния во времени, как и в ньютоновской механике, описывалось с помощью динамического закона. Известные состояния при константных внешних условиях не подвержены изменениям во времени и называются поэтому стационарными состояниями; эти состояния характеризуются дискретными значениями энергии и определяются математически как собственные решения системы линейных уравнений. Понятие дискретных стационарных состояний весьма существенно изменило прежнее представление об атоме.

Согласно прежней концепции, атом представлял собой неизменяющуюся фундаментальную единицу материи. Но атом Бора в качестве дискретного стационарного состояния той или иной механической системы оказывался уже не неизменным. Внешние силы, столкновения, химические реакции разрушали его, хотя он восстанавливался с прекращением нарушающего воздействия. В ходе материальных взаимодействий атомы постоянно разрушаются и постоянно восстанавливаются. Это характерное поведение дискретных стационарных состояний связано в его математическом описании с их поведением при определенных симметрических преобразованиях. Если динамический закон, лежащий в основании системы, остается инвариантным при определенном преобразовании, например при вращении в пространстве, то математическое представление ее дискретного стационарного состояния будет равным образом представлением группы вращения и тем самым не будет предусматривать, в рамках данного динамического закона, изменений во времени. Эта взаимосвязь между дискретными стационарными состояниями и симметриями системы в годы, когда Бор формулировал свою гипотезу, не была, разумеется, столь же ясной, как теперь; она была открыта позднее в результате основательных исследований в области квантовой механики Вигнером⁵⁰ и математиками.

Из понимания этой особенности дискретных стационарных состояний был вначале сделан тот несколько скользкий вывод, что химический атом есть не атом, а некая система из протонов, нейтронов и электронов и что именно эти элементарные частицы являются подлинно не-

изменными фундаментальными единицами материи. В отношении нейтронов это было не вполне справедливо, поскольку они распадаются на протоны, электроны и нейтрино, однако протоны и электроны казались настоящими элементарными частицами, и в течение определенного времени таким был всеобщий взгляд на вещи.

Следующей удивительной неожиданностью явилась электронная теория Дирака и открытие позитрона. В релятивистской теории квадрат энергии связан с квадратом импульса, и это квадратичное соотношение ведет к удвоению стационарных состояний; электрон дополняется позитроном. Поэтому под действием излучения могут образовываться пары электрон-позитрон. Позднее обнаружилось, что при радиоактивном распаде могут образовываться также пары электрон-нейтрино. Эти факты указывали на то, что даже электроны не являются неизменными единицами материи: они могут возникать и уничтожаться. Энергия может превращаться в материю, принимая форму частиц. Этот общий тезис подтвердился вскоре в ходе исследования высокогенергетических столкновений между частицами. Сегодня мы знаем из многочисленных экспериментов с космическим излучением и из опытов, проведенных на крупных ускорителях, что при подобных столкновениях, как правило, возникает множество частиц, из которых большинство нестабильно, как, например, π -мезоны, К-мезоны или гипероны. Эти процессы не следует называть делением или распадом частиц; они демонстрируют превращение энергии в материю. Помимо стабильных частиц — протона и электрона, — эксперименты выявили очень сложный спектр нестабильных частиц, явно обладающих всеми признаками дискретных стационарных состояний в согласии с теорией Бора. Они характеризуются квантовыми числами, а это значит — симметриями; и точно так же, как возбужденное состояние атома водорода может распадаться на фотон в нормальное состояние атома водорода, π -мезон может распадаться на μ -мезон и нейтрино. В результате понятие неизмененных единиц материи стало беспредметным; процесс деления утратил свой смысл, и каждую частицу мы вправе, если нам угодно, понимать как сложную систему. Протон можно считать состоящим из К-мезона и λ -гиперона, электрон — из π -мезона и нейтрино; они не более элементарны, чем атом водорода.

Вернемся же теперь с учетом всех этих сведений к нашему первоначальному вопросу о том, привела ли нас фи-

зика частиц к фундаментальным структурам, к подлинному пониманию природы. Ясно одно: к фундаментальным частицам она нас не привела. Спектр частиц столь же сложен, как таблица химических элементов. Конечно, можно сказать, что протоны и электроны в нашей части Вселенной играют по сравнению с прочими частицами доминирующую роль; точно так же можно сказать, что молекулы воды важнее, чем многочисленные другие молекулы. Но никакого фундаментального различия тут выявить не удается. Обсуждалась еще и другая возможность, а именно та, что будущие эксперименты с еще более высокими энергиями позволят обнаружить новые частицы, например кварк с зарядом $1/3$, которые окажутся более фундаментальными, чем остальные. Но ведь и эти частицы тоже будут подвержены превращениям материи в энергию и наоборот, так что неясно, в каком смысле их можно будет считать более фундаментальными⁵¹.

Здесь, как мне кажется, следует ненадолго возвратиться к вопросу о том, должны ли мы строить все более крупные ускорители. Разумеется, нельзя исключить той возможности, что при экспериментировании с более высокими энергиями нас встретят новые неожиданности, например обнаружится новый тип каскадов или частиц. Следует, впрочем, иметь в виду, что наши сегодняшние знания не дают ни малейших оснований ожидать чего-либо подобного. Наоборот, имеющиеся факты вполне позволяют заключить, что на накопительных кольцах женевского ускорителя уже достигнута асимптотическая область; и даже в космическом излучении, энергия которого достигает 10^5 ГэВ, не наблюдается никаких необычных явлений⁵². Из наших сегодняшних экспериментальных знаний вытекает непротиворечивая картина, и эта картина, похоже, допускает единую, без натяжек, теоретическую интерпретацию связей, существующих между различными силами и частицами, между сильными, электромагнитными и слабыми взаимодействиями и гравитацией.

И снова зададимся вопросом о том, сумела ли физика частиц открыть фундаментальные структуры природы. Мне кажется, мы вправе сказать, что были открыты фундаментальные симметрии. Под этим выражением, «фундаментальные симметрии», имеется в виду, что закон природы, от которого зависят спектр частиц и их взаимодействие, является инвариантным при известных группах преобразований. Этими группами определяется все пространство, в котором развертывается реальный мир. Важнейшие

группы — это, по-видимому, Лоренцова группа, определяющая пространство и время, группа SU_2 , относящаяся к электромагнитным явлениям, и масштабная группа, описывающая асимптотические явления при очень высоких энергиях. В физике частиц мы фактически исследуем структуру этих групп, и ее следует считать фундаментальной. Столь радикальное изменение понятийной системы науки — от фундаментальных частиц к фундаментальным симметриям — не всем приходится по душе; люди слишком привязаны к вопросам типа «Из чего же в конце концов состоит материя?» или «Можно ли расщепить протон при столкновении частиц очень высоких энергий?». Я считаю, однако, что эксперименты окончательно выявили бессмыленность подобных вопросов. В отличие от этого поиски фундаментальных симметрий — вполне осмысленная задача, хотя она и кажется чересчур абстрактной. Окончательные ответы мы получим только после экспериментального и теоретического изучения многочисленных конкретных подробностей явлений; и эта работа ведется в крупных физических лабораториях.

Что касается роли данной отрасли физики в рамках современной науки, то итоговый вывод из всего сказанного должен звучать, по-видимому, следующим образом: физика частиц информирует нас, строго говоря, о фундаментальных структурах природы, а не о фундаментальных частицах. Эти структуры намного более абстрактны, чем нам казалось 50 лет назад, однако понять их возможно. В грандиозном напряжении, с каким наша эпоха работает в этой области, позволительно видеть выражение человеческого порыва проникнуть в интимнейшую суть вещей. Я не виноват, если эта суть не материальной природы, если нам приходится иметь тут дело скорее с идеями, чем с их материальным отображением. Во всяком случае, нам следовало бы попытаться понять эту суть.