

ВЕРНЕР КАРЛ ГЕЙЗЕНБЕРГ
(1901—1976)

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ**К КОНЧИНЕ ВЕРНЕРА К. ГЕЙЗЕНБЕРГА**

От редакции. 1 февраля 1976 г. скончался лауреат Нобелевской премии Вернер Карл Гейзенберг, принадлежавший к той блестящей плеяде физиков, которые заложили основу современной квантовой механики. Отдавая дань памяти выдающегося физика, редакция публикует ниже переводы двух последних статей Гейзенберга: «Природа элементарных частиц» и «Космическое излучение и фундаментальные проблемы физики». Последняя статья представляет собой доклад на XIV международной конференции по космическим лучам в Мюнхене, который, ввиду наступившей болезни автора, был зачитан в заседании 18 августа 1975 г. профессором Р. Люстом.

В ближайших выпусках УФН в специальной рубрике, посвященной 50-летию становления квантовой механики, будут опубликованы переводы классических статей В. Гейзенберга — «О новом квантовомеханическом истолковании кинематических и механических связей» (1925) и «О наглядном содержании квантотеоретической кинематики и механики» (1927).

539, 12.04

ПРИРОДА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ *)*В Гейзенберг*

Поскольку при взаимодействиях частиц высоких энергий их число не сохраняется, вопрос о составных частях элементарных частиц может оказаться бессмысленным, и вполне возможно, динамика окажется центральной проблемой.

Ответ на вопрос «Что такое элементарная частица?» следует искать прежде всего в эксперименте, хотя вопрос этот требует также и философского рассмотрения. Поэтому я начну с краткого обзора важнейших экспериментальных результатов, полученных за последние пятьдесят лет. Из этого обзора будет видно, что беспристрастный анализ известных результатов уже дает определенный ответ на поставленный выше вопрос; теория же, как мы увидим дальше, не в состоянии добавить что-либо существенное к этому ответу.

Затем я перейду к философским проблемам, которые возникают в связи с представлением об элементарности частицы. Могут возразить, что в данном вопросе следовало бы, скорее, сосредоточиться на физике, а не на философии. Однако так просто отделаться от философской стороны вопроса нельзя. Фактически я убежден, что определенные ошибочные (боюсь сказать — и нынешние) направления развития теории частиц связаны с иллюзорными надеждами некоторых физиков на возможность полностью избежать философского подхода. Отказываясь от серьезной философии,

*) Werner Heisenberg, The Nature of Elementary Particles, Phys. Today 29 (3), 32 (March 1976). Перевод В. А. Белогона.

© Physics Today 1975.

© Перевод на русский язык,
Главная редакция физико-математической
литературы издательства «Наука»,
«Успехи физических наук», 1977 г.

физики неправильно ставят вопросы. Не будет большим преувеличением сказать, что хорошая физика то и дело страдает от плохой философии.

В конце статьи я собираюсь остановиться на этих спорных темах. Я был свидетелем подобных ошибок во время развития квантовой механики лет пятьдесят назад и теперь могу кое-что посоветовать, чтобы избежать подобных ошибок в будущем. Эти замечания позволяют нам закончить статью в оптимистическом тоне.

ЧИСЛО ЧАСТИЦ НЕ СОХРАНЯЕТСЯ

Начнем с экспериментальных фактов. Когда примерно пятьдесят лет назад П. А. М. Дирак предсказал, на основе своей теории электронов, существование античастицы — позитрона, понадобилось совсем немного времени для экспериментального подтверждения существования этой частицы. Это было сделано К. Андерсоном и П. Блэккетом, открывшими позитрон при регистрации процесса рождения пар, при котором искусственно образуется то, что теперь принято называть «антивеществом».

Это было открытие величайшей важности. Ибо прежде считали, что существуют только две фундаментальные разновидности частиц — электроны и протоны, которые, не в пример большинству других частиц, являются неизменными. Таким образом, число этих фундаментальных частиц считалось фиксированным, и к ним относились как к частицам «элементарным». Вещество представлялось построенным в конечном счете из электронов и протонов. Опыты Андерсона и Блэккета со всей определенностью доказали, что эта гипотеза о строении вещества была неверна. Электроны могли рождаться и уничтожаться; число их могло меняться, и они не могли быть «элементарными» в первоначальном понимании этого слова.

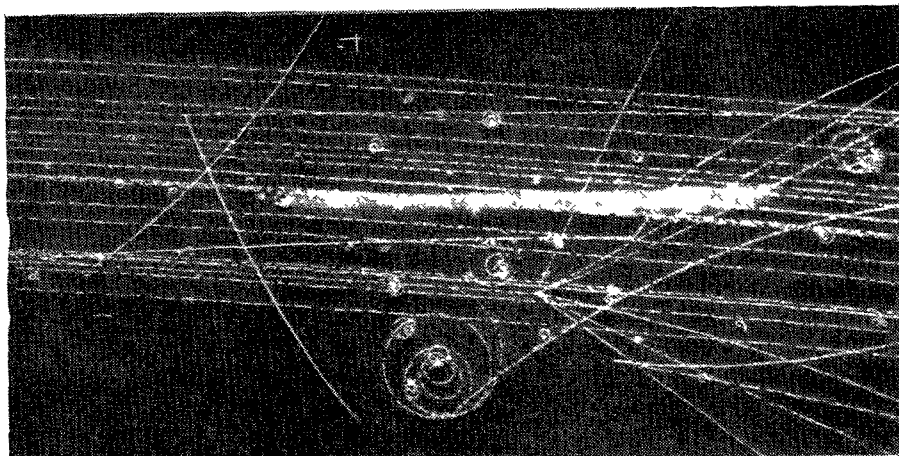
Следующим важнейшим шагом было открытие Ф. Жолио и И. Кюри искусственной радиоактивности. Из многочисленных экспериментов стало ясно, что одни атомные ядра способны превращаться в другие при испускании частиц — если соблюдались законы сохранения энергии, момента импульса, электрического заряда и другие законы, разрешающие такие трансмутации элементов. Порождение энергичными частицами новых частиц, предсказанное еще раньше специальной теорией относительности, стало вполне обычным явлением. Но вопреки более ранним представлениям, закон сохранения числа частиц не соблюдался. Однако остались физические свойства, которые характеризовались квантовыми числами, например, момент импульса и электрический заряд; соответствующие квантовые числа могли принимать положительные и отрицательные значения и подчинялись законам сохранения.

30-е годы принесли еще несколько важных экспериментальных открытий. В космическом излучении были зарегистрированы частицы чрезвычайно больших энергий. Частицы космических лучей, сталкиваясь с другими частицами, такими, как атомные ядра вещества фотоэмульсии, могут давать ливни, состоящие из множества вторичных частиц. Некоторое время многие физики верили в то, что такие ливни могут возникать лишь в силу каскадного механизма внутри тяжелых ядер. Позднее стало ясно, что даже столкновение двух протонов может порождать множество вторичных частиц в одном акте. В конце 40-х годов С. Пауэлл открыл пионы, которые играют главную роль в процессе множественного рождения частиц. Своим результатом Пауэлл еще раз подчеркнул тот факт, что преобразование энергии в частицы представляет собой решающий физический процесс и что бессмысленно говорить о «делении» первоначальных частиц. Пред-

ставление о «делении» частиц на составные частицы утратило свой смысл на экспериментальном уровне.

Эта новая ситуация была вновь и вновь подкреплена экспериментами 50-х и 60-х годов; было открыто множество новых частиц с различными временами жизни, но не было получено никакого ответа на вопрос: «Из чего состоят эти частицы?» (рис. 1). Протон можно получить из нейтрона и пиона, из лямбда-гиперона и каона, из двух нуклонов и антинуклона, и т. п. Можем ли мы поэтому просто сказать, что протон состоит из непрерывного вещества? Такое утверждение было бы ни правильным, ни ложным: в принципе не существует никакой разницы между элементарными частицами и составными системами. Именно этот результат является, по всей вероятности, наиболее важным экспериментальным результатом последних пятидесяти лет.

Такой ход событий наводит на следующую аналогию: сравним так называемые «элементарные» частицы со стационарными состояниями атома



«...И не было ответа на вопрос: «Из чего же состоят эти частицы?» Протон мог бы быть получен из нейтрона и пиона или из...» (Брукхейвенская Национальная лаборатория).

или молекулы. Элементарные частицы мы можем представлять как различные состояния какой-то одной молекулы, либо как множество различных молекул, как в химии. Таким образом, мы можем просто говорить об определенном «спектре состояний вещества». Эксперименты 60—70-х годов на больших ускорителях показали, что в такую картину довольно хорошо укладываются обнаруженные элементарные частицы. Подобно стационарным состояниям атома, элементарные частицы можно характеризовать квантовыми числами, т. е. классифицировать по их поведению при определенных преобразованиях. Возможные превращения определяются соответствующими законами сохранения. В случае возбужденного атома водорода его поведение относительно вращения определяет возможность его перехода в более низкое состояние с испусканием кванта света. Аналогично атому, в случае ф-бозона свойствами симметрии определяется возможность его распада с испусканием и превращением в ρ -бозон.

Стационарные состояния атомов обладают существенно различными временами жизни; то же самое можно сказать и о частицах. Основное состояние атома имеет бесконечное время жизни; имеется немало частиц с точно таким же свойством, в том числе — электрон, протон, а также дейтрон. Однако эти стабильные частицы не более элементарны, чем нестабильные

частицы: ведь основное состояние атома водорода представляет собою решение того же самого уравнения Шрёдингера, которое дает также и любое из возбужденных состояний. Подобным же образом, электрон и протон не более элементарны, чем лямбда-гиперон.

Проблемы экспериментальной физики частиц последних лет напоминают проблемы, которые стояли перед спектроскопией начала 20-х годов. В точности так же, как в те времена, когда все стационарные состояния атомов подытоживались в виде огромных таблиц в томах «Paschen-Götze», так и ныне ежегодно выходят обзоры свойств частиц с новейшими или исправленными старыми данными о массах и квантовых числах различных частиц. Работы такого рода соответствуют скорее астрономическим наблюдениям: каждый наблюдатель, очевидно, надеется случайно открыть самый интересный объект в своем секторе наблюдения.

ДВА ТИПА НАРУШЕННОЙ СИММЕТРИИ

Тем не менее существует специфическая разница между физикой атомных оболочек и физикой частиц. Энергия переходов в электронных оболочках атома мала, и поэтому характерные особенности, предсказываемые теорией относительности, не имеют значения, и поведение оболочек можно, по крайней мере приближенно, описывать нерелятивистской квантовой механикой. Поэтому основные группы симметрии в физике частиц и в физике атомных электронных оболочек различны. Галилеева группа в физике атомных оболочек заменяется группой Лоренца в физике частиц. Следует добавить к ней и другие группы, такие, как группа изотопического спина, которая изоморфна группе SU_2 , затем — группу SU_3 , и др. Определение всех групп, представляющих интерес для физики частиц, входило в важнейшие экспериментальные программы, и проблема эта в значительной степени была решена в последние двадцать лет.

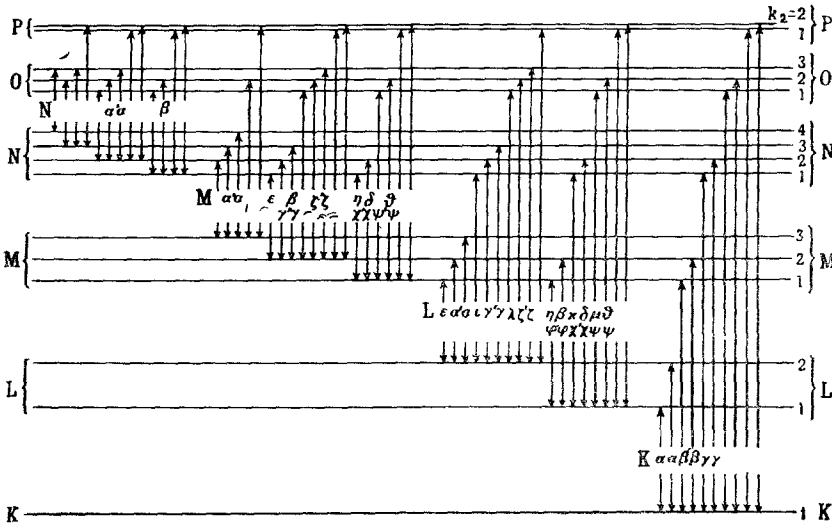
Из физики атомных электронных оболочек можно заключить, что группы, описывающие лишь приближенно законы симметрии природы, можно разделить на два существенно разных типа. В оптических спектрах атомов, например, группы O_3 и $O_3 \times O_3$ играют весьма различные роли. Фундаментальные уравнения квантовой механики атомов строго инвариантны относительно преобразований группы O_3 . Именно поэтому стационарные состояния с более высокими моментами импульса являются сильно вырожденными, т. е. там всегда имеется несколько состояний с точно совпадающими энергиями. Только в тех случаях, когда на атомы в этих состояниях воздействуют внешние электромагнитные поля, состояния эти расщепляются и проявляется тонкая структура — в хорошо известных эффектах Зеемана или Штарка.

Подобные же эффекты могут быть получены в тех системах, в которых основное состояние не является инвариантным относительно вращения, — таких, как состояние кристалла или ферромагнетика: два направления спина электронов в ферромагнетике не принадлежат точно совпадающим энергиям. В данном случае, согласно хорошо известной теореме Голдстоуна, также должны существовать бозоны с энергией, стремящейся к нулю при возрастании соответствующей длины волны; в случае ферромагнетика в роли голдстоуновских волн выступают блоховские волны — «магноны».

С совершенно иной ситуацией мы встречаемся в случае группы $O_3 \times O_3$, которая приводит к хорошо известной мультиплетности в оптических спектрах. Группа $O_3 \times O_3$ отражает лишь приближенную симметрию, которая проявляется, если спин-орбитальные взаимодействия становятся малыми для определенной части спектра, так что орбиты

и спины частиц могут подвергаться вращению почти независимо. Сама симметрия типа $O_3 \times O_3$ является результатом динамических свойств системы, и ею можно пользоваться лишь в некоторых участках спектра. Эмпирически эти два типа нарушенной симметрии различимы по существованию или несуществованию голдстоуновских мод. Если они обнаруживаются, правдоподобным является предположение о важной роли вырожденности основного состояния.

Если к физике частиц подходить с точки зрения опыта, накопленного физикой электронных атомных оболочек, то эксперименты говорят нам о том, что группа Лоренца и группа SU_2 должны интерпретироваться как фундаментальные законы симметрии, выражающие основной закон



«[Теоретики] должны ответить на предварительный вопрос: „Что значит понятие спектр количественно?“» (из книги Зоммерфельда «Строение атома и спектры», Vieweg, 1924).

природы. Электромагнетизм и гравитация выступают тогда в качестве тех эффектов дальнего действия, которые, согласно Голдстоуну, связаны с нарушенной симметрией основного состояния. Более сложные группы, такие, как $SU_3, SU_4, SU_6, SU_2 \times SU_2$ или $SU_3 \times SU_3$, следует понимать как симметрии динамических законов, подобно $O_3 \times O_3$ в физике атомных электронных оболочек. Можно выражать сомнение по поводу того, что группу растяжения или группу масштабного преобразования можно причислять к законам фундаментальной симметрии. Эти виды симметрии нарушаются в силу существования частиц конечной массы, а также — гравитационным воздействием больших масс во Вселенной. В силу их тесной математической связи с группой Лоренца, они, видимо, принадлежат к упомянутой фундаментальной группе. Такое специфическое соответствие эмпирически зафиксированных нарушенных законов симметрии с двумя предполагаемыми типами нарушенных симметрий усматривается из уже существующих экспериментальных данных, хотя считать это установленным еще нельзя. Важно подчеркнуть, что для любой группы симметрии, полученной в результате феноменологического анализа спектра, следует задаваться вопросом — и отвечать на него (если возможно): к какому из указанных двух типов эта группа принадлежит?

Стоит упомянуть еще одну специфическую особенность физики атомных электронных оболочек. Среди оптических спектров имеются некобинационные или слабо комбинационные системы термов, такие, как спектры, парагелия или ортогелия. В физике частиц аналогичной спецификой обладает спектр фермионов, подразделяемый на барионы и лептоны.

Очевидно, что указанная аналогия между стационарными состояниями атомов и молекул, с одной стороны, и частиц физики высоких энергий — с другой, представляется как почти полный качественный ответ на вопрос относительно «природы элементарной частицы». Но ответ только качественный. Для теоретика возникает тут же следующий вопрос: а нельзя ли обосновать такую интерпретацию количественными выкладками? Но мы должны сначала ответить на вопрос: «Что значит понятие спектр количественно?» (рис. 2).

ДИНАМИКА И ДОБАВОЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Многочисленные примеры как из классической физики, так и из квантовой механики указывают на общее правило, с помощью которого мы приходим к физическому пониманию. Напомню задачу нахождения спектра упругих колебаний стальной пластинки. Если качественного теоретического описания этого процесса нам недостаточно, приходится начинать задачу с задания упругих свойств пластинки, выражая их математически. Когда это сделано, следует добавить граничные условия, т. е. указать, круглая или квадратная пластинка, зажата ли она по краям или свободна. Только тогда можно вычислить, по крайней мере в принципе, спектр акустических колебаний пластинки. Правда, из-за сложности задачи мы зачастую не можем точно вычислить все частоты колебаний и ограничиваемся лишь низшими частотами, т. е. наименьшим числом пучностей пластинки; но дело не в этом.

Итак, для количественного определения упомянутого спектра заранее требуется знание двух элементов: точного знания упругих свойств пластинки и задания граничных условий. Последние могут быть названы «добавочными», ибо они зависят от частных обстоятельств: пластинка может быть вырезана по-разному. В качестве аналога можно указать электродинамический вариант колебаний в полости. Динамика поведения колебательной системы определяется уравнениями Максвелла, а граничные условия — формой полости. Нечто сравнимое происходит с оптическими спектрами атома железа. Уравнение Шрёдингера для системы из одного ядра и 26 электронов определяет динамику системы: граничными условиями определяется обращение в нуль волновой функции на бесконечности. Если бы такой же атом был заключен в ящик, его спектр был бы иным.

Чтобы связать эти известные результаты с физикой частиц, сначала нужно экспериментально определить динамические свойства системы «вещество», а затем сформулировать эти свойства математически. Затем нужно ввести граничными условиями добавочные элементы. В данном случае эти условия содержат предположения о так называемом «пустом пространстве»: о космосе и свойствах его симметрии. Иными словами, первым шагом должна являться попытка математической формулировки закона природы, определяющего динамику вещества. Вторым шагом является определение граничных условий. Без таких условий спектр найти нельзя. Можно, конечно, предположить, что спектр элементарных частиц внутри черной дыры радикально отличается от спектра элементарных частиц в нормальном пространстве, но — увы! — проверить эти догадки экспериментально невозможно!

Добавлю несколько слов о решающем первом шаге — формулировке главного закона динамики. Среди тех, кто занимается физикой частиц, имеются пессимисты, уверенные, что не существует никакого закона природы, определяющего динамику вещества. Это представляется мне совершенным абсурдом. Должна существовать какая-то четко определенная динамика вещества, иначе не может возникнуть никакой спектр; следовательно, математическое описание должно быть возможно. Пессимисты считают, что физика частиц не имеет иной цели, кроме как предоставления почти необозримой информации о частицах в виде «суперобзора свойств частиц». Разобраться в содержании такого супертома невозможно, поскольку он не содержит динамики вещества, а поэтому он едва ли представляет интерес.

Мне хотелось бы с особой силой подчеркнуть, что я не могу найти никаких аргументов в пользу такого пессимизма. Наблюдаемый спектр обладает резкими линиями, а это означает вполне определенные динамические закономерности поведения вещества. Экспериментальные результаты, упомянутые мною, с достаточной определенностью дают понятие о фундаментальной инвариантности основных законов природы, а из дисперсионных соотношений многое уже известно относительно причинных соотношений, которые содержатся в этих законах. Существенные черты закона природы, таким образом, уже отражены в надежно установленных данных. Немало других физических спектров были в итоге поняты количественно; и в данном случае такое понимание должно оказаться возможным, несмотря на крайнюю степень сложности. Именно эта сложность не позволяет мне обсуждать конкретное предложение, сделанное многие годы назад мною и В. Паули, относительно математической формулировки основного закона природы, на которую я по-прежнему возлагаю надежды как на самую корректную попытку. Здесь более уместно подчеркнуть, что формулировка такого закона представляет собою неизбежный предварительный шаг на пути количественного понимания спектра вещества. Ничто другое не достойно называться пониманием; что-либо иное едва ли значило бы больше, чем простой просмотр таблицы с данными о частицах; этим, по крайней мере теоретики, едва ли смогли бы довольствоваться.

ПРОБЛЕМЫ ФИЛОСОФСКИЕ

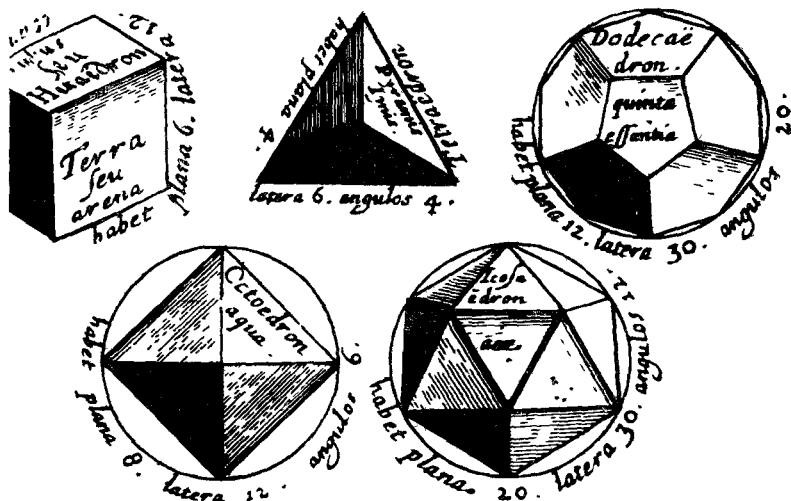
Встав на эту точку зрения, я перейду к философии, которая, осознанно или интуитивно, определяла направление развития физики частиц. Две с половиной тысячи лет философы и ученые задумывались над вопросом: «Что будет, если дробить вещество все мельче и мельче? Каковы наименьшие частицы вещества?». Разные философы приходили к различным ответам, каждый из которых оказывал свое влияние на естественные науки. Наиболее известным ответом является ответ философа Демокрита: попытка делить на все меньшие части кончается на неделимых, неизменных единицах, называемых атомами, из которых и состоит всякое вещество. Расположение и движение атомов определяют свойства вещества.

Для Аристотеля и его средневековых последователей, с другой стороны, представление о мельчайших частицах уже не столь четко. Правда, они предполагали существование мельчайших частиц для каждого вида вещества, так что дальнейшее деление уже изменяло бы характерные свойства самой субстанции; однако эти мельчайшие частицы считалось возможным подвергать непрерывному изменению, как это можно делать с самой субстанцией. С математической точки зрения, аристотелевские

субстанции допускали бесконечное (*ad infinitum*) деление. Вещество считалось непрерывным континуумом.

Наиболее ясную антидемокритовскую позицию занимал Платон. По его мнению, попытки все нового и нового деления приводят к математическим формам: правильным стереометрическим фигурам, определяемым их симметрией и треугольниками, из которых они состоят (рис. 3). Сами по себе формы эти еще не вещество, но вещество состоит из этих форм. Для такого элемента, как земля, например, характерной формой является куб, для огня — тетраэдр. Общим во всех этих философиях является попытка разобраться с антиномией бесконечно малого; подробное рассмотрение этой антиномии принадлежит Канту.

Имелись более наивные попытки понять парадокс бесконечно малого. Некоторые биологи выдвигали идею о том, что, например, яблочное семечко заключает в себе крошечную яблоню — целое дерево с завязями



«[Платоновские] формы сами по себе еще не являются материей, но они составляют материю. Для элемента — земли — характеристическим телом является куб...» (из книги Дэвиссона «*Philosophia pyrotechnica*», Париж, 1642).

цветов или плодов, внутри которых опять-таки содержатся еще гораздо более крохотные деревца яблонь, и так далее *ad infinitum*. Подобной забавной игре воображения предавались некоторые [физики] на раннем этапе обсуждения планетарной теории атома Бора — Резерфорда. Идея была такая: электроны — планеты атомной системы — населены чрезвычайно малыми живыми существами, которые возводят свои домики, обрабатывают свою почву и изучают свою атомную физику, обнаруживая, что и их атомы опять-таки являются маленькими планетными системами, и так далее в бесконечной прогрессии.

В основе любой подобной фантазии лежит антиномия Канта: трудно представить, что материя делима снова и снова, однако в меньшей степени затруднительно представить себе и то, что такая делимость с необходимостью должна прекратиться. Мы теперь понимаем, что парадокс этот объявляется ошибочным предположением о применимости нашей интуиции к сколь угодно малым масштабам.

Атомизм Демокрита оказал несомненное и сильнейшее влияние на физику и химию прошлого века. Эти атомистические воззрения позволяли интуитивно описывать элементарные химические процессы. Атом был чем-то вроде точечной массы ньютоновой механики. На этой основе была разработана вполне удовлетворительная статистическая термодинамика. Правда, атомы химиков оказывались вовсе не точечными массами, а маленькими планетными системами, подобно тому, как ядра атомов — сложными образованиями, состоящими из протонов и нейтронов. Тем не менее, и после таких уточнений электрон, протон, да и нейтрон могли считаться, казалось, подлинными атомами — неделимыми строительными блоками вещества. Итак, в XIX веке атомизм Демокрита стал существенной частью материалистического строения мира. Такая интерпретация легко воспринимаемая и, интуитивно правдоподобная, захватила воображение даже тех физиков, которые отмежевывались от всякой философии. Здесь я позволю себе повторить уже высказанное мною утверждение, справедливое для современной физики элементарных частиц, что хорошая физика невольно страдает иногда от плохой философии.

Мы не можем избежать употребления языка, тесно связанного с традиционной философией. Мы спрашиваем: «Из чего состоит протон? Делим или неделим электрон? Сложной или простой частицей является фотон?». Однако это неверно поставленные вопросы, ибо слова «делить» или «состоять» в этой связи в значительной мере утрачивают свой смысл. Нашей задачей должно быть приспособление нашего мышления и нашего языка, т. е. нашей научной философии, к новой ситуации, созданной данными эксперимента. К сожалению, эта задача чрезвычайно трудна. Неверно поставленные вопросы и неправильные наглядные представления автоматически просачиваются в физику частиц и уводят научные исследования в сторону от реальной природы. К рассмотрению таких заблуждений мы еще вернемся.

Но сначала несколько слов о постулате: «понимание требует наглядную (visual) картину явления». Некоторые философы провозгласили, что такие картины являются безусловными условиями для понимания. Так, например, мюнхенский философ Х. Динглер так говорит о теории относительности: только евклидова геометрия может считаться единственной допустимой корректной геометрией, ибо мы уже заранее предполагаем ее корректность при конструировании измерительной аппаратуры (в последнем пункте он, конечно, прав). Таким образом, рассуждает Динглер, экспериментальные факты, лежащие в основе общей теории относительности, нельзя описывать римановой неевклидовой геометрией, поскольку это привело бы к противоречию. Здесь, очевидно, надо исправить постулат: достаточно знать лишь то, что в пределах размеров наших приборов с достаточной точностью справедлива геометрия Евклида.

Нам придется признать тот факт, что из экспериментальных данных о явлениях весьма большого или весьма малого масштаба не обязательно следуют наглядные картины, и поэтому нам приходится обходиться без наглядности. Затем мы приходим к пониманию того, что антиномия самого малого решается в физике частиц весьма тонким способом, о котором ни Кант, ни философы древности не имели никакого понятия: слово «делимость» утрачивает свой смысл.

Если мы хотим сравнить результаты современной физики частиц с идеями любого из старых философов, то философия Платона представляется наиболее адекватной: частицы современной физики являются представителями групп симметрии, и в этом отношении они напоминают симметричные фигуры платоновской философии.

НЕПРАВИЛЬНО ПОСТАВЛЕННЫЕ ВОПРОСЫ

Однако меня больше занимает физика, чем философия. Я начну с того, что, по моему убеждению, развитие теоретической физики частиц с самого начала ведется неверно; это обусловлено прежде всего неправильно поставленными вопросами.

Первым делом я упомяну о существовании тезиса о том, что наблюдаемые частицы, такие, как протон, пион и гиперон, состоят из еще более малых частиц: кварков, партонгов, глюонов, очарованных частиц или чего-то еще, причем эти более малые частицы ненаблюдаемы. Совершенно очевидно, что здесь был задан вопрос: «Из чего состоит протон?», причем спрашивающий забыл о том, что сама фраза «состоит из» сохраняет достаточно ясный смысл только в том случае, если частицу можно раздробить на части малым количеством энергии — гораздо меньшим, чем масса покоя разрушаемой частицы.

Чтобы продемонстрировать, как это слово, которое представляется вполне определенным, может утрачивать в особых обстоятельствах свой смысл, я не могу удержаться и напому историю, которую любил рассказывать Н. Бор: в кондитерскую приходит маленький мальчик, у него всего два цента; он просит продавца дать разных конфет — ассорти — на эту сумму; продавец протягивает ему две конфеты и говорит: «А ассорти ты сделаешь сам». Представление «состоять из» для протона имеет не больше смысла, чем «сделать ассорти» в рассказе о мальчике.

Здесь многие читатели могут возразить, что гипотеза кварков возникла из данных эксперимента, а именно, из эмпирически установленного соответствия с группой SU_3 , а также что гипотеза эта оказалась успешной в применении к интерпретации множества экспериментов и вне пределов применимости группы SU_3 . Этого отрицать нельзя. Однако мне хотелось бы привести контрпример из истории квантовой механики: свидетелем этой истории был я сам. Это контрпример показывает явную слабость подобного рода аргументации.

До появления боровской теории атома многие физики верили, что атом должен состоять из гармонических осцилляторов. Оптический спектр содержит четкие линии, а четкие линии могут испускаться только гармоническими осцилляторами. Заряды этих осцилляторов соответствовали, однако, величинам e/m , отличным от этого значения для электрона; поэтому возникла необходимость предположить существование множества различных осцилляторов, поскольку в спектре имелось много линий.

Несмотря на все эти трудности, гёттингенский физик В. Фохт (Voigt) разработал в 1912 г. теорию аномального эффекта Зеемана для D -линий оптического спектра натрия на следующей основе: он предположил, что существуют два связанных осциллятора, которые в отсутствие внешнего магнитного поля излучают на частотах двух D -линий. Взаимодействие между этими осцилляторами и их связь с внешним магнитным полем могли быть предусмотрены так, что для слабых полей получалось правильное описание аномального эффекта Зеемана, а для сильных полей — эффекта Пашена — Бака. Для промежуточного интервала средних полей частоты и интенсивности выражались длинными и сложными квадратными корнями, которые, тем не менее, оказались пригодными для предсказания опытных данных.

Пятнадцатью годами позднее П. Йордан и я рассматривали эту же задачу на основе квантовомеханической теории возмущений. С удивлением мы обнаружили, что получаются в точности такие же самые формулы, что и у Фохта, причем его старые формулы для частот и для интенсивностей совпали с нашими даже для промежуточных интенсивностей поля.

Причина этого совпадения, как мы позднее поняли, имела чисто математическую природу. Теория возмущений привела нас к системе линейных уравнений, и искомые частоты определялись собственными значениями системы. Рассмотрение же динамической системы связанных гармонических осцилляторов в классической теории также приводит к системе линейных уравнений. Поскольку в теории Фохта существенные параметры решения привязывались к опытным данным, совсем не удивительно, что результаты в обоих случаях оказались одними и теми же. Однако теория Фохта не внесла заметного вклада в наше понимание строения атома.

Почему же эта работа Фохта оказалась столь успешной с одной стороны и столь бесполезной — с другой? Да потому, что намерением Фохта было рассмотреть только D -линии оптического спектра натрия без того, чтобы дать полное описание спектра. Фохт феноменологически применил специальный аспект гипотезы осцилляторов, игнорируя, однако, другие проблемы и трудности модели гармонических осцилляторов; по крайней мере, он сознательно их не касался. В действительности Фохт не принимал всерьез гипотезу об осцилляторах. Именно в этом смысле я опасаясь, что гипотеза кварков на самом деле не слишком всерьез принимается ее сторонниками. Статистика кварков, связывающие их между собой силы, причины их ненаблюдаемости в виде свободных частиц, рождение пар кварков внутри элементарных частиц — все эти вопросы остаются без более или менее определенных ответов. Если действительно всерьез принимать теорию кварков, необходимо формулировать точные математические предположения для теории этих частиц, для сил, удерживающих эти кварки вместе; необходимо также показать, что все эти предположения, хотя бы качественно, приводят к известным результатам физики частиц.

Такой же подход должен применяться и к любой другой проблеме в физике частиц. Мне ничего не известно даже о попытках такого подхода, и я боюсь, что в нынешней физике частиц любая попытка строгой математической формализации сразу же привела бы к противоречиям. Мои возражения, относящиеся к частной проблеме — гипотезе кварков — могут быть, таким образом, изложены в виде вопросов:

— Действительно ли гипотеза кварков дает больше для понимания спектра частиц, чем раньше давала гипотеза Фохта для понимания структуры атомных оболочек?

— Не скрывается ли за гипотезой кварков старая идея, давно развенчанная экспериментально, о принципиальной возможности различать простые и составные частицы?

ЖДУТ ЛИ НАС СЮРПРИЗЫ?

Обсудим теперь некоторые специальные вопросы. Если группа SU_3 действительно играет важную роль в структуре спектра частиц — а это именно так, судя по экспериментальным результатам, — то важно решить, действительно ли SU_3 представляет собою фундаментальную симметрию основного закона природы, либо это такая динамическая симметрия, которая по самой своей сущности соблюдается лишь приближенно. Если оставить открытым этот вопрос, то останутся открытыми и другие нерешенные вопросы — предположения о динамике рассматриваемой системы, и не будет достигнуто никакого понимания. Более высокие симметрии, такие, как SU_4 , SU_6 , SU_{12} , $SU_2 \times SU_2$, принадлежат, вероятно, к категории динамических симметрий, которые могут пригодиться для феноме-

нологического описания; их эвристическая ценность, однако, вероятно, может сравняться с эвристической ценностью птолемеевских циклов и эпициклов в астрономии. Они дают лишь весьма косвенную информацию об основных законах природы.

Среди экспериментальных результатов последних лет наиболее важными являются эксперименты, в которых были открыты бозоны с относительно высокими (3—4 $G\text{эв}$) массами и относительно большими временами жизни. Существование таких состояний предполагалось, причем эту возможность особенно настоятельно подчеркивал Г.-П. Дюрр. Насколько позволительно интерпретировать эти частицы, судя по их длительному времени жизни, как «состоящие из» других частиц с длительными временами жизни, — вопрос трудный, вопрос динамики, в которой играют роль все сложности физики многих тел. Однако введение опять и опять *ad hoc* новых частиц, из которых эти новые объекты предполагаются «состоящими», я бы считал бесполезной спекуляцией. Ибо это было бы снова попыткой отвечать на неправильно заданные вопросы, которые не представляют собой подлинного вклада в понимание спектра частиц.

В настоящее время в накопительных кольцах больших машин в Женеве и Батавии идет работа по определению полных эффективных сечений протон-протонных столкновений на экстремально высоких энергиях. Полученные результаты измерений говорят о том, что при очень высоких энергиях эффективное сечение возрастает примерно как квадрат логарифма энергии. Именно такое поведение эффективного сечения с энергией было довольно давно предугадано известной теорией для асимптотических значений энергии, при которых должна исчезать зависимость эффективного сечения от вида частиц. Регистрация столкновений между другими частицами приводит к аналогичным результатам; такой итог является сильным свидетельством в пользу предположения о том, что на больших ускорителях указанный асимптотический диапазон энергий уже достигнут, т. е. что даже при гораздо больших энергиях не следует ожидать никаких новых сюрпризов.

В общем не следует расценивать новые эксперименты как *deus ex machina*, т. е. как обещающие «вдруг» привести к пониманию спектра частиц. Эксперименты последних пятидесяти лет уже дали ответ на вопрос о природе элементарных частиц — ответ качественно вполне удовлетворительный, логичный и полный. Количественные же детали, как и в случае квантовой химии, — дело многолетнего анализа на основе тщательной деятельности в области физики и математики, но никак не дело «бурного» рывка.

Я бы закончил оптимистически, имея в виду те направления физики частиц, которые обещают успех. Новые экспериментальные результаты всегда ценны, даже если они просто дополняют табличные данные; однако они становятся особо интересными, если в них содержится ответ на критические вопросы теории. В самой же теории следовало бы пытаться формулировать точные предположения о динамике поведения вещества без каких-либо философских предрассудков. Динамику надо принимать всерьез и не довольствоваться смутными гипотезами, в которых существенные пункты остаются открытыми. Все, что вне динамики, — это всего лишь словесный пересказ табличных данных, но даже и в этом случае табличные данные предпочтительнее, поскольку в них содержится, по всей вероятности, все-таки больше информации, чем может дать их пересказ общими словами. Спектр частиц можно будет понять только тогда, когда станет известна фундаментальная динамика вещества. Именно динамика представляет собою центральную фундаментальную проблему.

523.165 539

КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ *)

В. Гейзенберг

Исследования космических лучей содействовали пониманию фундаментальных проблем физики, поскольку при этом обнаруживались пределы применимости применявшихся концепций. Так как космические лучи содержат информацию о поведении материи на уровне самых малых (элементарные частицы) и самых больших (Вселенная) масштабов, они представляют собою особую ценность для проверки физического смысла концепций, заимствованных из повседневной жизни, а также для поисков новых физических концепций.

Космические лучи играют весьма важную роль в развитии физики — такова их роль с момента их открытия, примерно 60 лет назад. Увлекательная история исследования космических лучей берет свое начало от первого обнаружения лучей, идущих из окружающего пространства к Земле. Затем в составе этого излучения были открыты частицы весьма высокой энергии, новые частицы с неожиданными свойствами, новые фундаментальные законы симметрии природы, а в итоге этих исследований была получена обширная информация о разреженной материи космического пространства, о существующих там ничтожных магнитных полях и о тех процессах, которые приводят, возможно, к возникновению космического излучения. Впрочем, я не буду следовать исторической последовательности.

В своем выступлении я постараюсь ограничиться рассуждениями о тех фундаментальных проблемах физики, для которых прогресс в познании закономерностей космического излучения оказался достаточно существенным и даже весьма стимулирующим. Для меня сейчас представляет интерес именно взаимосвязь между этой очень узкой областью физики и фундаментальными для всей физики проблемами. Указанная взаимосвязь впервые стала явной в начале 30-х годов, когда космическое излучение сыграло существенную роль в одном из наиболее важных открытий физики нашего столетия — открытии позитрона. Правда, вначале открытие это было совершено отнюдь не при исследовании космических лучей. Дирак в своей теории электрона предсказал существование положительно заряженной античастицы электрона. Однако первым убедительным доказательством существования такой частицы явилось обнаружение позитрона в космическом излучении Андерсоном, Блэккетом и Оккиалини. Существование позитронов и пригодность теории Дирака были со всей несомненностью продемонстрированы первыми снимками (в камере Вильсона) так называемых ливней, при которых фотоны порождают электронно-позитронные пары, а эти частицы в свою очередь рождают фотоны, по мере взаимодействия с веществом. Вскоре представилась возможность наблюдать позитроны и в процессах ядерных, а именно — при β -распадах.

Следует, пожалуй, добавить несколько слов о фундаментальной важности этого открытия. До этого открытия физики придерживались пусть более или менее неосознанно, философии греческого мыслителя Демокрита. Всякая попытка раздробить материю на все более и более мелкие части, полагали они, в итоге должна приводить к самым малым

*) W. Heisenberg, Cosmic Radiation and Fundamental Problems in Physics, Naturwissenschaften 63, 63 (1976). Перевод В. А. Белокопя.

© Springer-Verlag 1976.

© Перевод на русский язык,
Главная редакция физико-математической
литературы издательства «Наука»,
«Успехи физических наук», 1977 г

частям материи, далее не подверженным делению и поэтому называемым атомами. Атомы эти считались неделимыми, неизменными единицами материи, как бы строительными блоками, из которых строится вся материя вообще, а сами атомы (говоря по-современному — элементарные частицы) должны определять видимые свойства различных видов материи соответственно своим размещениям в пространстве и своему движению. Вся эта картина, как бы ни казалась она правдоподобной, была полностью разрушена теорией Дирака и следствиями из этой теории, начиная с открытия позитрона. При этом существенным было отнюдь не открытие еще одной, до того неизвестной, частицы — было открыто еще множество частиц без сколько-нибудь серьезных последствий для оснований физики; существенным было *открытие новой симметрии*, сопряженности частиц-античастиц, тесно связанной с лоренцевой группой специальной теории относительности, а также с превращением кинетической энергии сталкивающихся частиц в массу покоя новых частиц, и обратно. В нерелятивистской физике число частиц любого рода было константой движения, наподобие энергии и импульса. В релятивистской физике это число уже нельзя считать хорошим квантовым числом. Атом водорода, к примеру не обязательно считать состоящим из протона и электрона; его можно считать образованным из протона, двух электронов и одного позитрона, пусть даже такая более сложная конфигурация дает лишь ничтожную релятивистскую поправку к полной волновой функции водорода. Одним из следствий сложившейся ситуации было заключение о том, что при достаточно энергичном столкновении двух частиц могут порождаться в большом количестве новые частицы, а возможности порождения новых частиц ограничены лишь законами сохранения энергии, импульса, изоспина и т. п. Именно в космических лучах стали искать подтверждения этих догадок.

И в самом деле, уже на исходе тридцатых годов Бляу и Вамбахер обнаружили на фотопластинках, экспонированных на большой высоте, так называемые звезды — события, при которых из одной точки на пластинке рождалось множество треков. По всей видимости здесь происходило столкновение приходящей извне частицы высокой энергии с атомным ядром и порождение множества различных частиц в результате столкновения. Разумеется, интерпретация таких «звезд» не столь проста, поскольку началом процесса может оказаться своего рода каскадный ядерный процесс, аналогичный электрон-позитронным ливням, уже известным ранее, а вслед за каскадным процессом — своеобразное испарение ядра. Поэтому открытые при исследовании космических лучей «звезды» не были непосредственной демонстрацией множественного рождения частиц, о котором я говорил как о фундаментальном предположении, сделанном на основе теории. Однако методика экспериментов с космическими лучами со временем улучшалась, и спустя лет пятнадцать факт множественного [рождения частиц был установлен со всей определенностью.

Все эти результаты означали, что такие представления, как «разделимо на» и «состоит из» обладают лишь ограниченным диапазоном применимости. Подобно тому как в теории относительности концепция «одновременности», а в квантовой теории концепции «положения» и «скорости» могут применяться лишь со специфическими ограничениями, утрачивая свой смысл при некритическом использовании в несоответствующих случаях, так и концепции «разделимо на» и «состоит из» сохраняют свою определенность лишь в специальных, особых случаях. В тех случаях, когда малого количества энергии достаточно для разделения частицы на две или несколько частей, масса покоя которых очень велика по сравнению

с этой малой энергией, тогда и только тогда можно говорить о том, что частица состоит из этих частей и что она делима на эти части. Во всех других случаях слова «разделимо на» и «состоит из» утрачивают определенный смысл. То, что фактически происходит при взаимодействиях пары частиц весьма высокой энергии, представляет собою рождение новых частиц за счет их кинетической энергии. Энергия превращается в вещество в форме, как считается, элементарных частиц. Однако опять-таки различие между «элементарной» частицей и «составной системой» утрачивает определенный смысл. Частицы представляют собою стационарные состояния физической системы — «материи». Все эти весьма важные и фундаментальные результаты нашли свое экспериментальное подтверждение в исследованиях космических лучей.

Другим интересным результатом исследований космических лучей явилось открытие мюона (μ -мезона) Неддермейером и Андерсоном в 1937 г. Этот объект сначала был ошибочно принят за частицу, предсказанную Юкавой в качестве материального носителя сильного взаимодействия между нуклонами. Однако вскоре оказалось, что взаимодействие мюона с тяжелыми частицами, типа протона и нейтрона, слишком слабо, другими словами, мюон не может отвечать за сильное взаимодействие в ядрах. Мюон проявил себя, скорее, в качестве тяжелого «брата» электрона, отличающегося лишь большей массой. Открытие мюона не вызвало изменений в основах физических законов, подобных тем изменениям, которые повлекло за собою открытие позитрона. Однако обнаружение мюона раскрыло интересную особенность спектра частиц. Спектр этот разбился на две подсистемы, допускающие лишь слабую способность к комбинированию, адроны и лептоны. Подобные слабо комбинируемые системы термов хорошо известны по оптическим спектрам атомов. Однако остается открытым вопрос о том, насколько аналогичны причины такого расщепления в обоих типах спектров. Именно мюоны, если не говорить о нейтрино, представляют собою наиболее проникающую часть космического излучения и тем самым играют важную роль при определении интенсивности космического излучения на различных высотах в атмосфере.

Стоит также упомянуть о совершенно ином, притом довольно нелепом случае, когда мюоны помогли решению весьма фундаментального вопроса. Здесь, в Германии, перед самой войной правительство не одобряло теорию относительности, в особенности релятивистское замедление времени в движущихся телах, о котором было сказано, что это абсурдная чисто теоретическая спекуляция. Дело дошло даже до судебных разбирательств по поводу допустимости преподавания теории относительности в университетах. При одном из таких разбирательств я имел возможность высказаться о том, что время распада мюона должно зависеть от его скорости: мюоны, которые движутся почти со скоростью света, должны распадаться медленнее тех мюонов, которые движутся с меньшими скоростями — согласно предсказанию теории относительности. Экспериментальные результаты подтвердили такое предсказание: замедление времени могло наблюдаться на опыте непосредственно, и этот факт открыл двери для теории относительности в Германии. Поэтому я всегда чувствую признательность мюонам.

Вскоре после войны Пауэлл, в Бристоле, открыл пион, который играет весьма важную роль в большинстве явлений, связанных с космическими лучами. Объект этот удовлетворял всем условиям, сформулированным Юкавой для материальных носителей сильного взаимодействия; имелось, как оказалось позднее, несколько частиц такого рода, но именно мюон является адроном наименьшей массы и поэтому встречается почти в каждом событии при достаточно высоких энергиях. Кроме того, поскольку

пион распадается на мюон и нейтрино, открытие пиона пролило свет и на происхождение мюона.

Как и открытие мюона, открытие пиона не вызвало никаких фундаментальных сдвигов в основах физики. Оно еще раз подтвердило тот факт, что различные частицы представляют собою стационарные состояния более общей системы — материи, различающиеся по своему поведению из-за разницы в законах преобразования относительно фундаментальной группы. Эти группы преобразований являются более фундаментальными, нежели сами частицы.

В те времена, кроме релятивистской группы Лоренца, фундаментальной считалась только группа изоспина. Она была найдена (самим В. Гейзенбергом. — *Прим. перев.*) в 1932 г. в связи с задачами ядерной физики, но ее фундаментальный характер был понят только в связи с физикой пиона. Эксперименты с космическими лучами, вызывающими процессы с участием пионов, показали, что группа изоспина представляет собою закон строгой симметрии сильного взаимодействия, причем эта симметрия нарушается лишь электромагнитным или еще более слабым взаимодействием. Результаты этих работ можно было интерпретировать на основе предположения, что законы природы, лежащие в основе существующего спектра частиц, являются строго инвариантными по отношению к преобразованию изоспина и что нарушения этого вида симметрии вызываются наличием асимметричного вырожденного основного состояния. Сходные ситуации хорошо известны в квантовой механике твердых тел.

В космическом излучении почти одновременно с пионом были открыты и другие частицы. Они оказались тяжелее пиона и кое в чем «странными» по своим свойствам, поведению. Они обладали довольно длительными временами жизни, порядка 10^{-10} сек, что позволяло фиксировать их треки при помощи камеры Вильсона или эмульсий. Однако столь длительные времена жизни невозможно объяснить на основе лишь уже установленных законов симметрии и соответствующих квантовых чисел (барионного заряда, изоспина, момента импульса), поскольку эти законы симметрии приводили к существенно меньшим временам жизни. Именно поэтому новые частицы называли «странными». Корректная интерпретация для времени жизни новых частиц была дана Пайсом в 1952 г. Пайс придумал новое квантовое число, назвав его странностью, и ввел понятие о соответствующей симметрии (свойстве преобразований). Таким образом, именно исследования космических лучей привели к открытию новой группы симметрии. Поскольку же, как я сказал выше, группы гораздо важнее, чем сами частицы, то это достижение явилось весьма существенным вкладом в разработку фундаментальных проблем физики.

В то время физики понимали, что возможно найти еще гораздо большее количество частиц при условии, что удастся регистрировать объекты с еще меньшими временами жизни. Поскольку частицы представляют собою не что иное, как стационарные состояния общей системы — материи, то следует ожидать обнаружения множества различных частиц; большей частью — с весьма короткими временами жизни. Такие объекты можно наблюдать лишь в качестве так называемых *резонансных состояний*, а для этой цели нужна лучшая статистика, нежели та, на которую способна методика наблюдения космических лучей. К счастью, для физики элементарных частиц как раз вовремя удалось построить первые большие ускорители — были запущены большие машины, такие как брукхейвенский космогон, беватрон в Беркли, протонный синхротрон ЦЕРНа в Женеве. С течением времени на больших ускорителях были получены важные результаты в области физики частиц, а исследования в области

космических лучей дали крен в сторону астрофизических проблем. Такой ход событий был неизбежным, но он не всегда соответствовал интересам физиков, занятых частицами: такой поворот событий был для них неблагоприятным.

Прошли навсегда времена романтики, когда работа с камерами Вильсона, установленными в горах, так естественно сочеталась с лыжным спортом и альпинизмом, а запуск баллонов с эмульсией производили с очаровательного островка в Средиземноморье, с помощью аэропланов и военных кораблей итальянского флота, при дружеском содействии наших итальянских коллег. Я уверен, что теплое средиземноморское солнце внесло немалую лепту в достижение успеха с этими научными экспериментами. Но эти времена лучезарной беззаботности не вернуться; физика частиц неотвратно окунулась в деловитую атмосферу организованной работы на больших ускорителях.

В астрофизике космическое излучение превратилось в новое ценное средство исследования, обещающее давать информацию, далеко выходящую за рамки возможности наблюдений видимого, или инфракрасного, света звезд. Первой проблемой оказалась, естественно, проблема происхождения космического излучения. Еще Форбуш понимал, что определенная низкоэнергетическая часть космического излучения иногда объясняется солнечными процессами — некоторыми турбулентными явлениями у его поверхности. Однако весьма скоро стало ясно, что определенный ответ на вопрос о происхождении космических лучей требует достаточно полных знаний о плазменных электромагнитных полях в межзвездном пространстве, а также — в нашей Солнечной системе (здесь я мог бы напомнить о солнечном ветре, впервые рассматривавшемся Бирманом), в галактике и, наконец, в межгалактическом пространстве. Исследования этих полей превратились в центральную проблему астрофизики наших дней, и многие результаты здесь получены и получаются именно с помощью регистрации космических лучей. Что же касается вопроса об их происхождении, то общим мнением является точка зрения, согласно которой космические лучи высоких энергий возникают главным образом в сверхновых звездах, в «остатках» сверхновых и в пульсарах. Однако здесь мне не хотелось бы углубляться детально в астрофизические проблемы. Я предпочел бы вернуться к моему первому вопросу: где именно затрагиваются фундаментальные проблемы физики при исследованиях космического излучения?

Я только что упомянул *пульсары*, которые представляют собою звезды с самой высокой известной плотностью из всех до сих пор наблюдавшихся объектов. Плотность их вещества сравнима с плотностью атомных ядер. Вещество это удерживается собственным гравитационным полем. В связи с такими звездами возникают две фундаментальные проблемы. Одна из этих проблем имеет отношение к связи между гравитационным и другими видами взаимодействия. Другая проблема относится к уравнению состояния вещества при этих и еще более высоких плотностях. Однако прежде чем перейти к рассмотрению этих проблем, мне хотелось бы упомянуть некоторые ценные достижения исследований космических лучей в области физики частиц *даже в эпоху* больших ускорителей.

Частицы космического излучения обладают энергиями вплоть до 10^{19} эв, и вполне очевидно, что столь высокие энергии недоступны для ускорительной техники, по крайней мере в ближайшем будущем. Отсюда следует, что столкновения частиц со столь высокими энергиями можно исследовать только при помощи космических лучей — пусть даже результаты этих исследований зависят от низкой интенсивности потоков таких частиц, пусть бедна статистика отсчетов и точность данных невелика.

Вопрос, который нас при этих исследованиях интересует, состоит в установлении зависимости для сечений и иных параметров в области экстремальных энергий. Если при этих энергиях наступает область асимптотики, простирающаяся далеко за пределы энергий обычных частиц и резонансов, то не следует ли ожидать новых фундаментальных процессов или иных драматических изменений? Хотя информация на эту тему, полученная из наблюдения космических лучей, представляла едва ли нечто большее, нежели неясные намеки, она, тем не менее, стимулировала теоретические работы, которые, более 20 лет назад, привели нас к предположению о том, что полное сечение взаимодействия между любыми адронами должно при достаточно высоких энергиях возрастать как квадрат логарифма энергии. Следовательно, при повышении энергии должна начинаться область асимптотики. Но при этом полное сечение не должно оставаться неизменным, оно должно возрастать логарифмически. Такое же предположение возникло и на основе недавних экспериментов с накопительными кольцами в ЦЕРНе и Батавии. Эта асимптотическая область, по всей видимости, берет свое начало при энергиях порядка 10 Гэв (в системе центра масс) и простирается до 50 Гэв для протон-протонных столкновений, судя по экспериментам с накопительными кольцами в ЦЕРНе. Существенным достижением в Батавии явился тот результат, что упомянутое логарифмическое возрастание можно наблюдать также и для взаимодействия пионов или каонов с протонами. Это явилось сильным аргументом в пользу того предположения, что имеется общая асимптотическая область, которая, по всей видимости, и была достигнута в этих экспериментах. Для понимания физического смысла этой области оказывается достаточным описание частиц в виде почти сферических «облаков» непрерывно распределенной материи — без каких-либо ссылок на «частицы», из которых эти «облака» должны состоять. И это должно нас вполне удовлетворять, поскольку выражение «состоит из», как правило, неприменимо в физике частиц.

Еще одна проблема занимала умы физиков, занятых частицами на протяжении последних десяти лет. Нам известно, что группа SU_3 играет роль приближенного закона симметрии в теории спектра частиц. Простейшим представлением группы SU_3 , является представление трехмерное. Поэтому следует ожидать существования триплета частиц, соответствующих такому представлению. Электрические заряды этих частиц должны составлять $1/3$ либо $2/3$ элементарного заряда. Эти частицы были названы «кварками». Однако частиц такого рода никогда не удавалось наблюдать в каких-либо экспериментах на больших машинах. Отсюда был сделан гипотетический вывод, что кварки могли бы быть довольно тяжелыми частицами, скрепленными весьма значительными энергиями связи, и поэтому существующих машин просто недостаточно для получения свободных кварков. Именно в этом пункте оказывается весьма полезным космическое излучение, поскольку энергия первичных космических частиц может в тысячу и более раз превышать максимальную энергию частиц, достижимую на больших машинах. Тот факт, что даже в космических лучах не удалось обнаружить кварки, является весьма сильным аргументом в пользу того, что кварки не существуют. Если эти экспериментальные результаты останутся в силе, то мне представляется весьма затруднительной любая попытка придать сколько-нибудь определенный смысл утверждению «протон состоит из трех кварков», поскольку в этом случае утрачен определенный смысл и выражения «состоит из», и слова «кварк». Но какой же тогда смысл остается от подобных утверждений? Сходный скептицизм оправдан и в отношении других частиц, которые также предсказывались, но не были обнаружены: W -мезоны, партоны,

глюоны, магнитные монополи, очарованные частицы. Если наблюдать их нельзя ни на больших ускорителях, ни в космических лучах, то затруднительно согласиться с тем, что частицы эти хороши как подходящие концепции феноменологического описания. Здесь мы встречаемся с ситуацией, которая хорошо нам знакома уже из квантовой механики. Наш обычный язык заставляет нас задавать бессмысленные вопросы, например такие, как «какова орбита электрона, движущегося вокруг атомного ядра?». Ни слово «орбита», ни слово «движущийся» не являются достаточно хорошо определенными в силу соотношений неопределенности, а отсюда теряется смысл и самого вопроса.

Сказанное приводит к центральной проблеме, которая тесно связана с экспериментами в области космического излучения. Но сначала я хотел бы обсудить эмпирическую сторону проблемы. Я бы хотел разъяснить фундаментальную важность этой стороны для физики частиц и для физики вообще.

Из экспериментов последних десятилетий мы узнали, что различные частицы представляют собою не что иное, как различные стационарные состояния более общей системы — материи. Они характеризуются квантовыми числами, либо, если угодно, — свойствами соответствующих им преобразований фундаментальных групп. Теоретическое понимание физики частиц может означать одно и только одно: понимание спектра частиц. Отдельную линию оптического спектра железа саму по себе понять невозможно, но спектр можно понять, он может быть выражен через уравнение Шрёдингера для системы, содержащей 26 электронов и ядро железа.

Существенные элементы теоретического объяснения существования спектра частот достаточно хорошо известны, и их можно изучать и в рамках классической физики, и на уровне квантовой механики. Можно себе представить и упругие колебания струны, и электромагнитные колебания в полости. Можно думать и о стационарных состояниях атома, в том числе — атома железа. Во всех подобных случаях сначала необходимо иметь точные сведения о динамических свойствах системы; затем следует добавить специально задаваемые граничные условия. В случае струны первым шагом является математическая формулировка упругих и динамических свойств струны; затем, указывая, где эта струна зафиксирована, мы можем вычислять спектр ее колебаний. Для электромагнитных колебаний в полости уравнения Максвелла задают динамические свойства системы. Граничные условия заданы формой полости. В силу сложности такой задачи зачастую нет возможности точно вычислить полный спектр. Впрочем, хорошее приближение получается для низких частот. Для атома железа динамические свойства определены квантовой механикой, т. е. уравнением Шрёдингера. При помощи дополнительного условия, что волновая функция должна обращаться в нуль на бесконечности, фиксируются стационарные состояния. Если атом можно было бы запереть в небольшую коробочку, то стационарные состояния его были бы иными.

Исходя из этой аналогии, становится ясно, что первым условием понимания спектра частиц является *точная математическая формулировка динамики материи*. Достаточно очевидно, что само слово «частица» не должно фигурировать в такой искомой формулировке. Ибо частицы определяются позже — на этапе комбинирования динамики более общей системы — материи с надлежащими граничными условиями; частицы представляют собою структуры вторичные. Легко может оказаться, что спектр частиц нашего окружения во Вселенной заметно отличается от спектра частиц внутри весьма плотных нейтронных звезд, поскольку

граничные условия в этих случаях могут оказаться достаточно различными. Из этого примера вы видите фундаментальную важность знания динамики материи, но остается вопрос, каким же образом можно выработать математическую формулировку этой динамики.

Поскольку концепция частиц здесь не помогает, решающую роль должны играть групповые свойства динамического закона. Например, динамический закон вибрирующей струны инвариантен относительно сдвигов по времени и сдвигов вдоль струны, а также относительно вращений вокруг струны. Граничные условия приводят к нарушению второй инвариантности, но третья инвариантность, как правило, остается ненарушенной. Для электромагнитных колебаний в полости динамический закон инвариантен относительно полной лоренцовой группы; инвариантность эта частично нарушается граничными условиями.

Некоторые существенные инвариантности динамики материи уже известны: группа Лоренца и группа изотопического спина SU_2 . Группа масштабных преобразований должна быть, вероятно, также причислена к фундаментальным инварианностям. Однако мне здесь не хотелось бы углубляться в детальное рассмотрение этих видов симметрии законов динамики. Лучше вернемся к космическому излучению. Чем исследования космического излучения и астрофизических процессов вообще могут помочь нашему знанию о динамике материи?

Сначала о причинности. Из дисперсионных соотношений нам известно, что взаимодействие, которое проявляет материя, дает закон причинности. Точная математическая формулировка этого утверждения еще, вероятно, не вполне установлена, однако имеются довольно веские основания верить в то, что взаимодействие можно формулировать как взаимодействие локальное, аналогичное законам квантовой электродинамики. С этим утверждением несовместима нелокальность кулоновского взаимодействия. Если начать с этой проблемы, то можно считать вполне возможным, что исследование материи при экстремально высоких плотностях привело бы к получению наиболее непосредственной информации о локальности взаимодействия, проявляемого материей, а тем самым — о динамике материи.

В нейтронной звезде плотность имеет тот же порядок, что и плотность атомного ядра. При таких плотностях все еще сохраняется смысл утверждения, что ядра состоят из некоторого числа нуклонов, ибо для удаления протона или нейтрона из ядра достаточно небольшая, по сравнению с их массой покоя, энергия. Нуклоны в ядрах можно считать все еще достаточно далекими друг от друга — именно поэтому энергия их взаимодействия мала в сравнении с их массой покоя. Сказанное столь же справедливо и для нейтронной звезды, и факт этот позволяет получить теоретические оценки для уравнения состояния такого звездного вещества. Если же, однако, плотность является значительно более высокой, например — в звезде еще большей массы, сжатой гравитационным полем, тогда вопрос о том, из каких частиц состоит звезда, утрачивает определенность. Такой вопрос лишен определенного физического смысла, ибо пространство, приходящееся на одну частицу, оказывается меньшим, чем размер частицы в ее нормальном состоянии, и частица уже не может сохранять свою нормальную массу (покоя. — *Прим. перев.*). При этом взаимодействие становится столь сильным, что частицы, как правило, не могут оставаться на своем уровне (полосе) спектра масс. Иными словами, в этих условиях речь может идти только о смеси различных — всех возможных — частиц; а в таком случае более разумно говорить о непрерывной материи. Именно поведение такой непрерывной материи представляет собою фундаментальную проблему физики частиц.

Если бы удалось получить большую информацию об уравнении состояния не только в нейтронных звездах, но и (в особенности) в звездах еще большей плотности, то информация эта могла бы оказаться чрезвычайно важной для понимания динамического поведения материи. Что здесь более перспективно — то ли наблюдение космических лучей, то ли более обширные астрофизические исследования — судить не берусь. Я хотел бы лишь подчеркнуть важность самой проблемы.

Имеется и иная специальная область исследования космического излучения, в которой рассматриваемая проблема динамики материи может быть затронута совершенно с другой стороны. Если соударяются две частицы с экстремально высокой энергией, то в первый момент этого процесса соударения имеется малый диск экстремально плотной материи, которая затем взрывается и, уменьшая свою плотность при разлете, в итоге распадается на множество частиц. Именно таков процесс множественного рождения частиц, наличие которого хорошо установлено и который, разумеется, тем более интересен, чем выше энергия соударяющихся частиц. Если имеются первичные частицы космического излучения с энергией 10^6 Гэв, тогда плотность первоначального диска вещества, испытывающего столкновение, в тысячи раз превышает плотность вещества нейтронной звезды.

Таким образом, изучение поведения таких «ливней», вызванных первичными космическими лучами, обладающими экстремальными энергиями, должно предоставить нам ценную информацию о динамике материи. В этом смысле весьма многообещающим является тот факт, что указанный асимптотический режим взаимодействия уже достигнут, по всей видимости, или по крайней мере достаточно близок, в экспериментах с накопительными кольцами ЦЕРНа и Батавии. В начальной фазе соударения на таком режиме первичные частицы можно себе представить просто в виде облачков непрерывной материи, плотность которой экспоненциально спадает у поверхности. Такая модель объясняет логарифмический рост полного сечения как функции возрастающей энергии. Я должен все-таки указать на характерное различие между двумя типами упомянутых экспериментов — с исследованием высокоплотных звезд и с дисками при высокоэнергичных столкновениях. В первом случае важную роль играет гравитация, а во втором она несущественна. Поэтому важная для рассматриваемой проблемы информация будет получаться в разной форме от этих разного рода опытов.

Обращаясь, в заключение, к общим проблемам, упомянутым вначале, мне стоило бы, пожалуй, сказать о том, что особая роль космического излучения во всей области физических исследований покоится на двух фактах. Космическое излучение содержит информацию о поведении материи и на уровне самых малых масштабов, и на уровне структуры Вселенной в целом, т. е. мира наибольших масштабов. Обе эти крайности недоступны для непосредственного экспериментирования, исследовать их можно лишь по косвенным выводам, основанным на рассуждениях, в которых концепции повседневной жизни должны быть заменены иными, достаточно абстрактными новыми концепциями. Лишь это позволит нам вникнуть в смысл таких слов, как «крайний предел» и «бесконечность» в применении к природе.

Именно в этом смысле можно все еще считать исследования космического излучения — несмотря на все изменения стиля и методов экспериментов — весьма романтической и крайне захватывающей наукой.