

*Х.Юкава* ЛЕКЦИИ  
ПО ФИЗИКЕ

---

ЭНЕРГОИЗДАТ

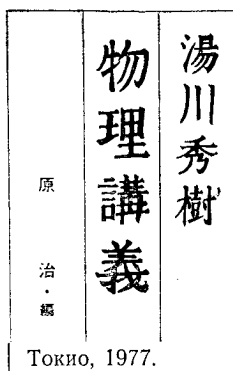
*Х.Юкава*

# *ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ*

---

*Перевод с японского  
кандидата физико-математических  
наук И. И. Иванчика  
С предисловием академика  
М. А. Маркова*

МОСКВА • ЭНЕРГОИЗДАТ • 1981



УДК 530.1

**Юкава Х.** Лекции по физике: Пер. с яп./ С предисл. акад. М. А. Маркова. — М.: Энергоиздат, 1981. — 128 с.

В лекциях лауреата Нобелевской премии известного физика-теоретика Х. Юкавы в доступной форме излагаются фундаментальные проблемы развития физики в прошлом и настоящем. Не ограничиваясь физикой, автор затрагивает также ряд других очень интересных тем — психологию научного творчества, вопросы теории познания в физике и т. п.

Книга выдержала в Японии пять изданий.

Для научных работников-физиков. Может быть рекомендована аспирантам и студентам физических, физико-технических, инженерно-технических факультетов.

Табл. 2. Ил. 22.

Ю  $\frac{20408-524}{051(01)-81}$  9—81(A). 1704020000

© Hideki Yukawa, 1975  
 © Перевод на русский язык, предисловие к русскому изданию, Энергоиздат, 1981

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

«Лекции по физике» проф. Хидеки Юкавы, как предупреждает сам автор, — не введение в физику, а, скорее, размышления о физике и физиках.

Ценность книги в ее своеобразной автобиографичности, и это тем более интересно, что речь идет об автобиографии человека, внесшего значительный вклад в науку.

Всегда привлекают внимание оригинальные точки зрения на обсуждаемые решения и нерешенные проблемы. Размышления о физике проф. Юкавы изложены так живо, что заставляют размышлять и читателя. И здесь есть много поводов для размышлений.

Не кажется недостатком, что лекции не обработаны, даны в «сыром» виде, в виде записи непринужденной остроумной беседы лектора с аудиторией, так сказать, в виде ценной «руды».

Хорошо, что сохранена в тексте живая связь лектора с аудиторией. Если удалить эти стенографические вставки («смех», «смех»), то живой характер лекций существенно нарушится. Эти вставки заставляют читателя почти присутствовать среди слушателей лекции.

Интересны размышления лектора о физиках (одиночках, полемистах, коллективистах). Замечания о Сольевевских конгрессах, об «одиночке» де Бройле и о «плохом характере Паули» несколькими фразами воскрешают эпоху. Привлекают внимание отдельные отступления лектора, например остроумные замечания о перегрузках в учебных планах студентов, оставляющих мало времени для самостоятельных работ. Лекции, безусловно, ценны в чисто литературном отношении, они представляют собой и определенную историческую ценность, ценность исторического документа.

Книга выдержала в Японии несколько изданий. Надеюсь, что ее с интересом встретят и читатели нашей страны.

*Академик М. МАРКОВ*

## **ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО ОРГАНИЗАТОРА ЛЕКЦИЙ ПРОФ. ХАРА**

Проф. Юкава любезно согласился читать нам в течение трех дней лекции по основным проблемам физики. Замысел организации этих лекций возник следующим образом.

Несколько лет назад мне нужно было встретиться по делу с проф. Юкавой. Оказалось, что он читает лекции в Нагойском университете, и я отправился туда. Лекция была в разгаре. Просто ждать мне не хотелось и около часа я слушал захватывающе интересный рассказ Юкавы, в котором история физики разворачивалась как величайшая драма, разыгранная людьми предшествовавших поколений. Юкава-лектор обладал огромной силой воздействия, но я, конечно, не решился просить его записать текст своих лекций.

Мне, как и многим в Токио, очень хотелось прослушать лекции профессора целиком. Мы попросили проф. Юкаву прочесть лекции как можно более широкой аудитории, и несмотря на большую занятость он согласился. Мы очень ему благодарны. Попросим лектора начать.

## ВСТУПЛЕНИЕ

Мои лекции названы «Основные проблемы физики». Но я недостаточно к ним готовился, и может случиться, что лица, ранее самостоятельно занимавшиеся физикой или уже слушавшие подобные лекции, будут разочарованы. К тому же я многое забыл. Вот почему вместо основных проблем физики я представлю вам нечто незавершенное: попытаюсь говорить о физическом мире так, как я построил его для себя. Конечно, вряд ли кто-либо способен воссоздать в своем внутреннем мире здание физики полностью. Не знаю, выполнил ли для себя я эту работу хотя бы наполовину. Физику, ее мир, в течение долгого времени создавали многие ученые. Каждое новое поколение, включаясь в творчество, должно идти дальше, взяв за основу созданное предшественниками. На новом уровне нужно понять, что еще необходимо для усовершенствования физической картины мира, которая и сейчас далеко не закончена. Иногда здание физики кое-где приходится разбирать и перестраивать. Ее мир в целом несет на себе печать отдельных индивидуальностей. Сам я тоже, оглядываясь назад, неоднократно перестраивал свой собственный физический мир. Материал, конечно, сохраняется, но время от времени добавляется кое-что новое, в свете которого приходится переосмысливать то, что знал раньше. Сколько раз приходилось так делать!

Мои теперешние лекции, возможно, будут отличаться от того, что проф. Хара слушал около двух лет назад. Некоторые изменения естественны, но я бы не сказал, что основы картины физического мира к сегодняшнему дню стали намного яснее.

Тем из вас, кого волнует вопрос, что такое элементарные частицы, могу сразу сказать, что за последние один-два года получено довольно много новых данных.

Повышалась энергия ускорителей. На созданных в последнее время ускорителях со встречными пучками (см. примеч. 1) выполнены эксперименты при высоких энергиях. Получен ряд неожиданных результатов, но даже они не являются для нас по-настоящему новыми, так как со времени первого знакомства и по сегодняшний день мир элементарных частиц всегда был странным и загадочным. К обсуждению этих вопросов лучше подойти постепенно. Поговорим сначала немного об удивительности элементарных частиц.

## ЛЕКЦИЯ 1

### Удивительность мира элементарных частиц

Хорошо известные элементарные частицы — электроны и фотоны, или электроны и электромагнитное поле. Их теория — квантовая электродинамика — создавалась шаг за шагом начиная с 1900 г. и ныне близка к совершенству. В ней, правда, остались некоторые нерешенные фундаментальные вопросы, но в основном это верная теория, которая, по-видимому, сохранится в будущем в таком же смысле, в каком и теперь сохраняется ньютонова механика или теория относительности.

К электрону и фотону привыкали долго, и эти частицы сейчас уже не воспринимаются как необычные, а открытые после них элементарные частицы (или объекты, похожие на элементарные частицы) кажутся странными. Например,  $\mu$ -мезон — частица, очень похожая на электрон. Разве не удивительно, что существуют точно две (электрон и  $\mu$ -мезон) очень похожие друг на друга частицы? Ведь было бы менее странно, если бы столь похожих частиц было больше двух. Почему, кроме электрона, есть еще  $\mu$ -мезон (см. примеч. 2)? Имеются ли другие частицы этого типа? Если да, то, значит, пока обнаружены всего две. Удивительно также, что им соответствуют разные нейтрино. Далее, известен большой класс родственных друг другу частиц, включающий мезоны, протон и нейтрон. Среди них есть так называемые странные частицы (см. примеч. 3), но кто знает, может быть, странны не они, а обычные, хорошо нам знакомые частицы? И почему странных частиц много? С увеличением массы странных (или не странных) короткоживущих частиц становится все больше, так что давно

известные нам элементарные частицы — лишь малая часть этого вновь открытого множества. Скорее, именно наши старые знакомцы составляют весьма специализированный класс.

В понятие *особый* в зависимости от ситуации вкладывают разный смысл, но как бы то ни было электрон — в высшей степени особая частица. Он стоит особняком, в то время как, например, в семействе адронов (см. примеч. 3) частиц много и все они имеют довольно большую массу. Может быть, в действительности странным и необычным является именно электромагнитное поле? Оно обладает многими особыми свойствами. Конечно, если бы в мире не существовало ничего, кроме электронов и фотонов, то и говорить было бы не о чем. Но реально существует совокупность объектов, называемых нами элементарными частицами, и в целом ситуация не очень понятна. Кое-что мы выясняем шаг за шагом сейчас, есть факты, известные уже давно. Знаем мы довольно мало, и то, что известно, выглядит удивительным. Поскольку мы не понимаем целого, отдельные части кажутся нам очень загадочными. Можно думать, что от понимания элементарных частиц, т. е. в сущности, от понимания всего физического мира, мы далеки, но насколько — нам не известно. Мир элементарных частиц содержателен и разнообразен. Объекты, поначалу представлявшие загадочными, группируются в большие семейства и тем самым теряют ореол необычности, а то, что ранее казалось тривиальным, начинает выглядеть удивительным. И в таком вот мире нам предстоит разобраться. Пока никто не пришел к его пониманию, и неясно даже, по одному или нескольким путям можно будет приблизиться к цели. У нас нет карты с обозначенным маршрутом, пользуясь которой мы могли бы двигаться. При исследовании подступов к влекущему нас миру мы выбираем те пути, которые кажутся нам интересными.

### **Что можно почерпнуть из истории науки?**

История развития науки (кстати, очень долгая) на первый взгляд хорошо известна — ведь мы изучали ее в школе. Прошрое представляется нам ясным: все, что происходило, описано в учебниках, и хотя изложение может быть разным, по существу всюду пишут одно и то же. Изучение физики как раньше, так и теперь начи-



нают с ньютоновой механики; с XVIII в. по сегодняшний день в этом отношении ничего не изменилось.

Получается так, как будто самые разные области физики начали свое развитие из одной точки и надо лишь несколько варьировать повествование в зависимости от избранной темы. Пути развития, например, термодинамики, статистической механики, электродинамики, теории относительности или квантовой механики при таком подходе кажутся заранее определенными. Но если заинтересоваться людьми, закладывавшими основы этих наук, подумать, чему и как мы можем у них научиться, как они рассуждали, то все начинает представляться по-иному. Тот, кто не чувствует здесь разницы, учится, вероятно, только для сдачи экзаменов (*смех в аудиториях*) или ради устройства на работу. Но физик по призванию не может не различать эти два подхода.

Я буду говорить о том, чему можно научиться из прошлого, как преломить прошлый опыт применительно к настоящему моменту. Полагаю, что подходить к прошлому лишь как к набору свершившихся фактов было бы крайне неумно.

Ньютон не знал электродинамики, об электромагнитных явлениях в его время не было известно почти ничего. Он выполнил тщательные измерения в оптике и строго сформулировал свое понимание наблюдаемых фактов, а про другие связанные с оптикой области почти ничего не знал. Но мы с вами знаем все последующие открытия. И если в качестве отправной точки изучения физики мы выбираем ньютоновы «Начала» (см. примеч. 4), написанные три столетия назад, то при попытках использовать сегодня опыт создателя «Начал» нам надо по возможности проникнуться обстановкой XVII в. Сделанное Ньютоном поистине изумительно. Такое же ощущение возникает и при знакомстве с трудами Максвелла, но Ньютон потрясает больше, чем Максвелл. С этих замечаний мы и начнем.

### О первоисточниках

Конечно, я не знаю точно, как шел Ньютон к созданию своей теории. Ведь я нахожусь на уровне современной физики, и наши представления, естественно, расходятся. Но, может быть, расхождение это не столь уж велико?

Одно из самых глубоких понятий физики — понятие материи. Имея его, можно говорить о движении. Отсюда — понятия силы и, конечно, пространства и времени. Указанный ряд понятий образуется совершенно естественно, и надо признать, что ньютонова механика искусно построена на основе именно этих, таких современных идей.

При изучении классической механики в школе мы пребываем в спокойно-безмятежном состоянии духа, но ее создателю все было отнюдь не так ясно, как нам, он терзался сомнениями. Нам никогда не узнать, какую тяжелую работу совершил и какие мучения вынес Ньютон, построивший прекрасную, «рафинированную» теорию, поначалу казавшуюся современникам даже несколько мудреной. Но потом все поняли, что он оставил нам полностью законченную, совершенную постройку.

Обычно изложение механики начинают с материальной точки (см. примеч. 5), но сам Ньютон нигде о ней не упоминает. Вряд ли он был настолько несообразителен, чтобы не додуматься до этого понятия. Но тогда почему не ввел он его с самого начала? Может быть, потому, что ощущал здесь слабое место своей теории?

Материальная точка и вектор (см. примеч. 6) — на первый взгляд, вещи разные. Кстати, геометрия, по-моему, наука эмпирическая. Мы с вами знакомимся с науками на очень высокой ступени их развития, когда области знания четко классифицированы. По этой классификации геометрию относят к чистой математике, а евклидову геометрию считают типичным образцом математической дисциплины. В XX в. математика сильно аксиоматизирована (см. примеч. 7), в основном трудами Гильберта, и теперь евклидова геометрия преподносится совсем не так, как раньше, хотя по существу она, конечно, не изменилась.

Из школьного курса вы хорошо знаете, что евклидову геометрию можно формулировать либо аксиоматически, либо постулативно, либо в форме определений. Создана она более двух тысячелетий назад и с тех пор применяется в почти неизменном виде. Это потрясает до глубины души. Теперь попробуем встать на другую, в каком-то смысле противоположную точку зрения. Действительно ли сам Евклид создал евклидову геометрию, точно не известно, но если именно он ее придумал, то вряд ли он был абсолютно хладнокровен в момент на-

писания своего труда. А в последующие века след индивидуальности автора постепенно стирался, изложение стали вести с помощью определений и аксиом. Вот почему при взгляде на первоисточник из нашего далека он кажется мудреным, сложным, перегруженным ненужными подробностями.

Не будем вдаваться в детали геометрии. Я хочу лишь сказать, что подобно всей геометрии евклидова геометрия стала чисто математической дисциплиной не сразу, а в результате постепенного «рафинирования» ее математиками. Неевклидова геометрия содержит в себе евклидову, и она тоже постепенно аксиоматизируется. Что делать, это один из способов развития науки. Если физик (а я причисляю себя к их числу) создал что-то новое, то его работа, как и у Евклида, кажется потомкам чрезвычайно запутанной, переполненной бесполезными частностями и естественно недоумение, зачем ему проделывать такой тяжелый напрасный труд?

В своем первоначальном виде геометрия отличалась от созданной впоследствии чисто математической дисциплины. Евклидова геометрия в основном создавалась для описания результатов измерений на поверхности Земли и в чистую науку она превращалась постепенно.

### **Легенда о Ньюtone как человеке не от мира сего**

В наше время основные положения ньютоновой механики формулируют не так, как было у самого Ньютона, но изменения касаются только стиля изложения, а не существа его механики, с самого начала имевшей строгую абстрактную форму. Времена меняются, но, думаю, не ошибусь, сказав, что сначала изучают ньютонову механику как таковую без определения *классическая* и лишь при постепенном продвижении к квантовой механике о механике Ньютона начинают говорить как о классической, подчеркивая, что это — не более, чем определенная стадия развития механики. В ее эмпирическом характере особенно легко убедиться, вспомнив о прикладной механике, к которой она очень близка. Университетские курсы прикладной механики сводятся к теории дифференциальных уравнений, которые решают для самых разнообразных случаев. Даже задача трех тел, всегда считавшаяся важной проблемой, очень близка прикладной математике, поскольку является задачей теории дифференциальных уравнений. Ньютоновы урав-

нения движения известны, геометрия задана. Ведь именно в этом исходный пункт, а остальное — догма. Может быть, математики со мной и не согласятся, но я рассматриваю такие задачи как догму.

Собственно, ньютонова механика наиболее соответствует понятию догмы. Область ее применимости чрезвычайно широка, достижения велики, и нет ничего удивительного, что она имеет тенденцию перейти в догму. Другое дело — оптика. Вещество и свет — субстанции несомненно разные. Физика ньютоновой поры была неразрывно связана с астрономией, развившейся впоследствии в небесную механику. Какие еще науки существовали тогда? Механика, оптика и ... алхимия. Даже в наше время границы химии не очень ясны, а о современнике Ньютона Бойле вообще трудно сказать, кем он был — физиком или химиком? Граница перехода алхимии в химию довольно темна.

Ньютон тоже занимался алхимией. Как протекала его жизнь? Он написал книгу по оптике и делил свое время между четырьмя областями науки: оптикой, механикой, алхимией и теологией. Собственно, не теологией, а священным писанием, почти полностью записанным в Библии. Но в то время это было своеобразной наукой. Книг по этим вопросам он не оставил, но времени на них тратил довольно много.

Это показалось вам странным? Но в данном случае странность как раз уместна (*смех в аудитории*). Ведь Ньютон — человек, сформулировавший идеальную схему, на века определившую рамки для мышления физиков. Разве может быть, чтобы такой человек не делал что-нибудь еще (*смех*), столь же необычное? Одно время и я думал, что Ньютон был начисто лишен реальных человеческих черт и занимался лишь наукой. Но укажите мне человека, который изо дня в день, из года в год только и делает, что работает? (*смех в зале*).

В детстве я прочел несколько анекдотов о Ньюtone. В одном из них говорится, что, проголодавшись после упорных трудов, он опустил в кастрюлю вместо яйца часы, а затем, забыв об этом, продолжал работать. Образцовый ученый (*смех в зале*). Все мы много занимаемся, но не настолько велики, чтобы про нас рассказывали подобные анекдоты. Вот другой случай в том же роде. Говорят, Ньютон держал кошку и, чтобы она могла ходить к соседу, проделал в заборе дыру, а когда

кошка принесла котят, он и для них сделал маленькие дырки. Человек с такими особенностями не может не быть великим ученым (*смех*). Жаль, что при изучении ньютоновой механики в школе ощущение реальности Ньютона как человека совершенно исчезает.

Недавно я ознакомился с другими рассказами о Ньюtone, исходящими не от физиков, а от известного экономиста Кейнса. Он разобрал и упорядочил все, оставшееся после Ньютона, и в результате тщательного исследования обнаружил много скрытого, не согласующегося с общераспространенным (и ложным) представлением, будто Ньютону несвойственны были живые человеческие чувства. Кейнс выявил много свидетельств обратного. Именно тогда я живо ощутил реальность существования Ньютона-человека и очень заинтересовался им.

### Взгляд Ньютона на вещество

Книга Ньютона «Математические начала натуральной философии» отличается от обычных учебников механики не какими-то второстепенными деталями, а коренным образом. В ней отсутствует понятие материальной точки. Ньютон говорит о маленьких частицах, или корпускулах. В наше время их называли бы субматерией (см. примеч. 8).

В этой связи естествен вопрос — а что в те времена понимали под веществом? Платоновский эфир и его материалистическое толкование, по традиции идущее от Аристотеля, близки современному понятию эфира. Идея об атомном строении вещества в то время придерживалось меньшинство, скорее эту мысль считали ересью. в XX в. положение противоположно: сейчас без атомной теории вообще нет науки. Теория атомного строения вещества стала набирать силу в XIX в., но тогда еще не все были с ней согласны, а в XX в. атомная теория (в самом широком смысле слова) стала господствующим, ортодоксальным учением; тем не менее, нельзя сказать, что в наше время не существует других гипотез о природе вещества. Я имею в виду понятие эфира.

Точка зрения о неограниченной делимости вещества восходит еще к Аристотелю. Лично я считаю ее вполне разумной. Для отказа от идеи о безграничной делимости нужны веские причины, без них она кажется само собой разумеющейся. Принимая эту точку зрения и производя

деление, на разных стадиях будем получать разные результаты. При дроблении камня наряду с крупными возникают мелкие осколки; если бить сильнее, осколки станут совсем маленькими. Иногда говорят, что эфир — совокупность самых мелких осколков. Понятие эфира позволяет избавиться от фундаментального противоречия, заложенного в идее о неограниченной делимости вещества.

Содержание идеи о неограниченной делимости сводится к указанию способа, как продолжать деление. Обычно подразумевают, что при делении объект не движется. Но реальные объекты физического мира не двигаться не могут, а это осложняет деление. Представить себе движение в непустом мире нелегко; но, с другой стороны, не ясно, какие изменения могут произойти в пустоте, т. е. там, где совершенно ничего нет. Наличие изменений, по смыслу этих слов, означает, что в каких-то местах пространства что-то есть и это что-то движется, перемещается. Как же может существовать изначально пустое пространство, откуда оно берется?

Возможно, современный сообразительный человек быстро придумает ответ, но вот Декарт был в затруднении. Формулы механики сплошных сред дались людям с трудом. Наиболее восхитительный результат на пути вывода этих формул — волновая теория света Гюйгенса (см. примеч. 9), открытый им принцип; но выразить теорию Гюйгенса математически строго удалось не сразу. Причина затруднения — наличие пустоты. А при отказе от пустоты трудно описать движение.

Ньютон не стал тривиально отрицать возможность существования эфира, хотя и понимал, что для атомной теории понятие пустоты очень удобно. Несомненно, это важнейшее понятие. Есть пустота — могут быть и атомы. Поскольку имеются атомы, существует и пустота. Эта точка зрения восходит к Демокриту. Ее формулировку я рассматриваю как одно из самых крупных в истории науки открытий. Движение возможно, так как есть пустота. В качестве движущихся объектов можно рассматривать атомы или большие тела.

Но что такое материальное тело? Прежде всего, это — объект, всегда тождественный самому себе, причем не субъективно, а объективно тождественный. Недушевленное тело, разумеется, не может что-то думать о самом себе (иметь субъективное мнение), но, напри-

мер, люди имеют свои мнения типа сопоставлений «я вчерашний — я сегодняшний», «я 10 лет назад — я теперь». Для них утверждение о самосохранении истинно не только потому, что им самим так кажется, но и потому, что другие видят то же\*. В этом смысле объект, обладающий свойством быть тождественным самому себе, является материальным телом. Таковы и атомы. Механика Ньютона описывает движение тел, например атомов, в пустоте, т. е. там, где ничего, кроме них, нет. Ньютон имел в виду демокритовы атомы, нечто вроде твердых тел. Он и сам говорил это. Правда, в книге «Математические начала натуральной философии» об этом не сказано ни слова, но у Ньютона есть другая книга, посвященная оптике. В ней много места отведено описанию оптических опытов, а в конце содержится около 30 вопросов и ответов, с помощью которых Ньютон «выводит» вещественный мир из атомов. По Ньютону мир сотворен Богом и приводится в движение божественным повелением и божественной волей; множество атомов тоже сотворено божеством. Мы видим здесь сотворение абсолютно неразрушимых объектов. Человек, убежденный, что после долгих трудов ему удалось создать абсолютно неразрушимую вещь — несомненно верующий (*смех в зале*). Возможно, подобная вера встречается и в наши дни, но Ньютон верил не в себя, а в Бога. Его Бог — управитель, господин, законодатель.

### Внутренние стимулы творчества

С современной точки зрения образ мышления Ньютона может показаться странным, но, по-моему, как раз эти странности важны для понимания его внутреннего мира. Я не считаю, конечно, что такой образ мышления совершенно необходим для занятий наукой. Но почему Ньютон так самозабвенно (вспомните анекдотический эпизод с часами) занимался механикой? Скорее всего, он был уверен, что этого от него потребовал Бог. Бог существует; наверно он существует — в этом основа мировосприятия Ньютона.

Начиная с этого места, я буду говорить о своих предположениях, поэтому дальнейшее прошу воспринимать не как истину, а лишь как мои собственные фантазии.

---

\* По-японски *субъективный* — *сюкан* — буквально *мнение хозяина*, а *объективный* — *каккан* — буквально *мнение гостя*. — *Прим. пер.*

Отец Ньютона умер вскоре после рождения мальчика, и мать снова вышла замуж. Ньютон был одинок, беспомощен и слаб телом. И это существо стало великим ученым. Очень странное, маловероятное событие! Иначе ведь можно было бы подумать, что самый плохой вариант для занятий наукой — благополучное детство (*смех в зале*), такой вывод вытекал бы из результата, это, так, сказать, теория результата. Мне кажется, что, потеряв отца в начале жизни, Ньютон стремился заменить его себе Богом. Но что такое Бог-отец? Это — руководитель. Странное понимание? ... Но если есть Бог-руководитель, то должны быть и руководимые.

Такой вывод очень характерен для Ньютона. Сам он детей не имел, т. е. не стал отцом-руководителем, и обратился к Богу. Думаю, что Ньютон хотел стать его сыном, его руководимым сыном. Не так ли и студенты иногда жаждут, чтобы преподаватель их пожурил? Но современные преподаватели слишком безразличны, нейтрально вежливы, и нет надежды, что когда-нибудь поругают (*смех в зале*).

Итак, Бог-отец руководит Вселенной, одновременно он поддерживает порядок, является законодателем, а также творцом. Но как это делается, как происходит движение тел, которым управляет Бог? Как это происходит — Ньютон открыл сам. Или восстановил, как любил он утверждать.

Я думаю, что у него все-таки были подобные настроения. Неужели он стал бы трудиться что есть сил, не будь у него этого внутреннего стимула? В такой науке, как физика, и такой человек, как он? Стимулы для занятий физикой, конечно, могут быть самыми разнообразными. Физики обычно говорят, что занимаются своей наукой потому, что она интересна. Но почему интересна именно физика? Зачастую даже сами физики не могут ясно ответить на этот вопрос.

### «Глубинный порядок» по Гейзенбергу

Совершим скачок и от Ньютона перейдем к Гейзенбергу (см. примеч. 10). В его автобиографии перед читателем проходит много известных людей, таких, как Бор, Паули и другие, материал подан очень интересно, диалоги прекрасно передают характер и возраст собеседников. Ясно ведь, что логические доводы совсем юного, не



достигшего еще 20 лет человека не всегда безупречны, и Гейзенберг пишет, что, восстанавливая беседы, он старался вспомнить, какими он и его собеседники были тогда. Поэтому книга получилась очень хорошей.

В ходе спора собеседники многократно пересказывали с темы на тему. Перечитывая свои записи этих диалогов, Гейзенберг стремился определить сущность того, на чем настаивал оппонент. Они говорили о самых разных физических явлениях; при отборе диалогов для автобиографии Гейзенберг классифицировал их в зависимости от обсуждаемого физического принципа. Поэтому при отборе надо было выявить глубинный смысл («центральный или скрытый порядок») или, говоря обычным языком, основной, глубоко проникающий универсальный закон. Как он додумался до такой идеи? Возможно, она пришла к нему в детстве, когда он дома слушал беседы в кругу друзей своего отца, преподавателя классических предметов — греческой, римской и средневековой истории и культуры. В десятилетнем возрасте Гейзенберг знал уже диалог Платона «Тимей».

Насколько мне известно, диалог «Тимей» посвящен натурфилософии. Платона вообще считают атомистом, но его взгляды отличались от взглядов школы Демокрита. Признавая четыре вида атомов, из которых состоят земля, вода, огонь и воздух, Платон сопоставлял их правильным многогранникам. Многогранники — четырехгранники, шестигранники, восьмигранники, одиннадцатигранники, двадцатигранники — строились из треугольников, четырехугольников, пятиугольников. Что это, как не (пусть несколько идеализированное) учение об атомах? Сейчас мы сказали бы, что Платон строил геометризированную картину мира.

Гейзенберг неоднократно повторяет, что он всю жизнь хотел придерживаться подобной ориентации мысли, очень близкой современным идеям.

Правильные многогранники — тела, имеющие наивысшую симметрию. Гейзенберг же интересовался законом наиболее глубокого упорядочения естественного мира, искал закон, выражающий скрытую симметрию. Поиски этой симметрии выкристаллизовались в его мировом уравнении (см. примеч. 11). В него, по сравнению с уравнением Дирака, Гейзенберг добавил члены, характеризующие взаимодействие материи с самой собой. Исходя из этого нелинейного уравнения, он пытался построить

довольно простую теорию, позволяющую описать элементарные частицы.

Что я хочу этим сказать? Я не обсуждаю вопрос о справедливости или ошибочности единой теории Гейзенберга, а хочу лишь подчеркнуть, что он тоже с юных лет стремился придерживаться одного и того же направления мысли. Гейзенберг беседовал с Бором о самых разнообразных вещах, но при этом его мысль была направлена совсем не в ту сторону, что мысль Бора (хотя, например, в интерпретации квантовой механики их позиции по существу совпадали). Различия в их оценке копенгагенской интерпретации (см. примеч. 12) — не более, чем нюансы, но в дальнейшем, насколько я понимаю, их философские позиции значительно разошлись. Мне хотелось бы еще остановиться на каком-либо из разговоров Гейзенберга с Бором, но времени не осталось, и я не буду больше отступать от темы лекции.

### **Материальная точка и твердое тело**

Вернемся к Ньютону и вновь настроимся на его образ мысли. Если человек, не жалея сил, трудится над сложными проблемами, то можно сказать, что он стремится найти глубинное упорядочение. Яркий пример этого дает Эйнштейн; о нем мы еще поговорим. Ньютон, с одной стороны, придерживался идеи об атомном строении вещества, восходящей еще к Демокриту, но, с другой стороны, он не отбрасывал полностью и понятие эфира: ведь в его трудах нет упоминания о материальной точке. Значит, он не думал, что атомы не имеют размеров.

В «Началах» много тревожных, полных сомнения мест. Например, обсуждение понятия массы Ньютон начинает с определения объема и задает плотность. На первый взгляд, этим все ставится с ног на голову, поскольку хорошо известно, что плотность — это масса, деленная на объем, и нельзя ввести понятие плотности раньше определения массы. Действия Ньютона выглядят подозрительно, ибо неясно, как оперировать с плотностью, не имея определения массы. Но если учесть, что он придерживался атомной теории, то его изложение перестает казаться удивительным. При наличии в пространстве атомов плотность выражает их число в единичном объеме. Как определить это число — вопрос техники, а не принципа. Если в единичном объеме имеется 100 ча-

стиц, то плотность будет 100, а если 1000 частиц, то — 1000.

Суть здесь в том, что объем нельзя выбирать исчезающе малым, ибо в нем должно содержаться некоторое число атомов. Вы спросите, какая разница между бесконечно малой величиной и величиной пусть малой, но конечной? В том, что пока она конечна, сохраняется возможность по-разному переходить к пределу. Материальная точка, строго говоря, — объект с тремя степенями свободы (см. примеч. 13; понятие степени свободы вошло в обиход уже после Ньютона). Если тело не является материальной точкой, а имеет хоть малое, но конечное протяжение, то число его степеней свободы больше трех. Простейшая модель — идеально упругое тело, для построения которого надо рассмотреть тела с очень большим модулем упругости, отбрасывающие друг друга при ударе практически без деформации. Идеально упругое тело (о нем можно говорить так же, как об идеально жестком) получается в пределе при неограниченном увеличении упругости (жесткости). Фактически мы создаем здесь предельное понятие.

Среди макроскопических тел реального мира нет ни материальных точек, ни идеально жестких тел, это — предельные образы. Но при переходе к атомному миру, к микроскопическим масштабам возникает вопрос, какое из двух рассматриваемых понятий больше соответствует природе «кирпичиков», слагающих мироздание? Или, может быть, кирпичики устроены сложнее? Мы то с вами знаем, что они гораздо сложнее.

У идеально жесткого тела шесть степеней свободы (оно может вращаться). Ньютон рассматривал такие объекты, но нельзя сказать, что он до конца разработал их динамику.

Изучаемая нами механика идеально жесткого тела создана Эйлером, который вывел хорошо известные уравнения, носящие его имя (см. примеч. 14). В прошлом они вызывали у студентов трепет. Трудным казалось то, что нужно применять две системы отсчета — закрепленную на жестком теле (вращающуюся) и связанную с Землей (неподвижную) — и рассматривать задачу в этих двух системах. Решение можно быстро получить, пользуясь эйлеровыми углами (см. примеч. 15) или, что немного сложнее, величинами, похожими на введенные позднее спиноры (см. примеч. 16). Сам

Эйлер, конечно, не вводил спиноров, его уравнения записаны с помощью эйлеровых углов. Чтобы проделать подобный вывод, Ньютону не хватало аналитических средств. Приблизительно в то же время были написаны уравнения движения жидкости, и Эйлер начал развивать гидродинамику, т. е. механику сплошных сред.

### О моменте количества движения

Попробуем рассмотреть материальную точку как предел при уменьшении размеров идеально жесткого тела. При этом можно придти к объекту, отличающемуся от обычной материальной точки, если задуматься над вопросом, куда при уменьшении размеров тела деваются три вращательные степени свободы. Анализируя судьбу исчезающих степеней свободы, можно отчетливо выявить разницу между этими двумя подходами. Дело здесь в способе перехода к пределу.

Рассмотрим момент количества движения, который приобрел особую значимость после создания квантовой механики, в связи с понятием спина (см. примеч. 16). Спин равен целому или полуцелому числу, умноженному на  $\hbar/2\pi$ , где  $\hbar$  — постоянная Планка. Момент количества движения играет большую роль при рассмотрении систем материальных точек (в частности, идеально жесткого тела). Наличие момента количества движения, например, у шара означает, что шар вращается вокруг некоторой оси (см. примеч. 17). Обозначив  $r$ ,  $L$ ,  $m$  и  $v$  радиус, момент количества движения, массу и скорость, напомним  $L = mvr$ . Угловая скорость вращающегося твердого тела  $\omega = v/r$ . Так как  $L = I\omega$ , где  $I = mr^2$ , то  $L = mr^2\omega$ . Что мы получим в пределе, при уменьшении обеих частей этого равенства? Возможны разные варианты. Если  $r$ , уменьшаясь, приближается к нулю, то  $L$  при этом тоже стремится к нулю, и вращение исчезает. Но угловая скорость  $\omega$ , вообще говоря, возрастает при уменьшении  $r$ . По какому закону стремится  $\omega$  к бесконечности? Если  $v$  ограничено, то  $L \rightarrow 0$ . Даже при увеличении  $v$  может оказаться, что произведение  $mr^2\omega$ , выражающее момент количества движения, в пределе обращается в нуль. Это один из вариантов решения нашей задачи.

В квантовой механике электрон имеет спин (см. примеч. 18), и тем не менее его считают точечной частицей. Думаю, что 99 человек из 100 не ощутят здесь противो-

речия. Элегантный вывод уравнения Дирака не оставляет места для сомнений. Едва ли один человек из сотни задумается, нет ли связи между результатом Дирака и классической задачей о вращении тела. Конечно, такой связи может и не быть — ведь квантовая частица коренным образом отличается от классической. Говоря об этой возможности, я хотел лишь подчеркнуть сложность понятия материальной точки и то обстоятельство, что с ним могут быть связаны очень каверзные вопросы.

Заниматься такими проблемами, особенно при полном отсутствии экспериментов (*смех в зале*) — дело ужасно неблагодарное. Я лично ломал над этим голову с юных лет. Размышляя о подобных вещах, невозможно не устремиться к квантовой механике и теории относительности (*смех*). Не знаю, занимался ли я этим очень энергично, или «по принципу наименьшего действия». Скорее всего, все-таки, кое-как, ибо на переднем крае науки за это время были совершены великие дела.

Профессор университета обязан читать лекции. Правда, свое сегодняшнее выступление я бы лекцией не назвал, скорее это вольная беседа. Итак, профессор должен читать лекции. Начинаются они с механики, т. е. с ньютоновой механики, о которой мы сегодня и говорим. Если их строить в соответствии с учебниками, то придется говорить только об упругих телах да о жидкостях.

В ньютоновых «Началах» многое удивляет. Это и естественно. При изучении механики мы почти не тратим на нее своих душевных сил в отличие от создателей этой науки. Вот, скажем, при въезде в Токио видишь высокие, в несколько десятков этажей, здания. Теперь их конструкции стали экономичнее, а первые строители таких зданий создавали чудовишно крепкие сооружения. Ведь это же не просто — добиться, чтобы здание не рухнуло во время постройки (*смех*). Хорошо быть спокойным тому, кто видит готовую, зарекомендовавшую себя работу, а первопроходец не может не беспокоиться. Ньютона терзали самые разные тревоги. Сомнения его были столь велики, что он не упомянул ни о материальной точке, ни о твердом теле.

### О деформациях и напряжениях

Ньютон почти ничего не сделал в теории деформируемых сплошных сред, да это было и невозможно на 20

стадии развития анализа. При попытке рассмотрения напряжений и деформаций упругих тел (см. примеч. 19) мысль упирается в тупик, ибо вещество приходится считать непрерывным, а на самом деле оно имеет атомарную структуру. Как в обычной теории упругости учесть наличие кристаллической решетки? Такие вопросы исследовал Коши, но ввиду сложности полученных им результатов их почти не касаются в обычных курсах механики сплошных сред. Результаты Коши формулируются в виде ограничений на модуль упругости. В настоящее время эти проблемы утратили свою остроту.

К вопросу о структуре вещества в исключительно малых (микроскопических) объемах можно подойти несколько иначе. Меня всегда занимала модель из кубов, выстроенных наподобие кристаллической решетки. Обычное рассуждение таково. Если внутри куба достаточно много атомов, то кубы можно считать непрерывными. Тогда в точках касания кубов возникают напряжения и деформации. Так как тензор деформаций симметричен (см. примеч. 20), симметричен и тензор напряжений.

Меня эти соображения не убеждают. На первый взгляд они правдоподобны. Но при более внимательном рассмотрении здесь, хотя и по-иному, чем в случае абсолютно жесткого тела и материальной точки, выступает проблема момента количества движения. В самом деле, почему нельзя считать, что любое из рассматриваемых маленьких тел энергично вращается? Разные тела вращаются по-разному. При рассмотрении напряжений обычно отбрасывают антисимметричные члены, возникающие при учете вращения, но при некоторых способах перехода к пределу эти антисимметричные члены в тензоре напряжений могут сохраниться. Их исключение — лишь один из возможных способов предельного перехода, при котором получается одна из разновидностей упругого континуума. Вращение близких маленьких тел не может сильно различаться. Точное аналитическое представление этого — соответствующую предельную операцию — я сейчас не помню; надо выполнить некий специальный переход к пределу.

Все это весьма правдоподобно, но, обдумывая план лекции, я поленился освежить в памяти точный результат того специального предельного перехода. Однако не выбрасывать же из лекций такой хороший кусок!

Решил оставить, как есть. Думаю, вы меня простите, ведь и студенты часто не прочь полениться (*смех в зале*); впрочем, вопрос поставлен четко и похоже, что есть единственный разумный ответ.

Кстати, я прочел в газете, что некоторые университеты теперь предлагают экзаменационные задачи, не имеющие ответа (*смех*). Ответить невозможно, так как не хватает некоторых условий, и смысл вопроса в том, чтобы ответить, почему нельзя ответить на этот вопрос. Сверхвысокий класс, а? Правда, здесь не ясно, как определить, что такое истинно высокий класс.

Похоже, нынешние дети ужасно несчастны. Они постоянно должны быстро давать мастерские ответы на бесчисленные вопросы. Я, например, теперь никуда не гожусь. Смог ли бы я сейчас поступить в университет, не поучившись сначала в спецшколе повышенного типа, с ее кошмарной дрессировкой? Правда, если хорошенько подумать, вопрос этот — тоже вопрос без ответа (*смех*). Тренировка, конечно, неизбежна. Но так приятно чувствовать себя хоть немного свободным. Не в том ли состоит прелесть ощущения свободы, чтобы оставаться спокойным и уравновешенным в любой ситуации? А когда начинают суетиться, хвататься то за одно, то за другое, забывают, что и зачем делали в предыдущий момент ... — как это похоже на действия компьютера в режиме переполнения! (*Смех.*)

В обсуждаемой теме осталось еще много неясного. С появлением квантовой механики задача о вращении приобрела особую важность. Хотя это и не имеет прямой связи с темой лекции, мне хотелось бы подчеркнуть наличие подводных камней в задаче о вращении. Применяя квантовую механику к решению конкретных вопросов, вы можете в своей повседневной работе столкнуться с необходимостью подойти критически к казалось бы очевидным вещам.

Я много отвлекался, но сейчас постараюсь сосредоточиться и быстро и кратко разобрать оставшиеся вопросы.

### **Физика: «Экономия мышления»?**

О пространстве-времени в учебниках механики пишут не так уж много, может быть, потому, что эти понятия кажутся всем очевидными. Пространство мы представляем себе обычно как трехмерное евклидово простран-

во (см. примеч. 12), в котором справедлива теорема Пифагора. Зная кое-что об общей теории относительности и римановом пространстве, мы говорим, что область риманова пространства, имеющая специальную метрику (см. примеч. 13), может, в частности, оказаться нашим трехмерным евклидовым пространством.

Без понятия пространства физика теряет смысл (но и в утверждении, что пространство существует само по себе, независимо от тел, смысла тоже нет). Понятие пустоты введено еще Демокритом, но пустота и пространство — не одно и то же. А слова *космическое пространство* означают просто очень удаленные от нас области.

Среди ученых нет единого мнения о том, что, собственно, представляет собой физика. Наиболее ясно это обнаруживается на примере ньютоновой механики — исторически первой физической теории, в отношении которой взгляды всех, казалось бы, должны полностью совпадать. На самом же деле общепризнаны только ее математические формулы; их запись может несколько различаться, но в общем они одинаковы. А в отношении смысла механики разные физики имели и имеют различные взгляды.

В XIX в. немецкие и австрийские физики, особенно Мах и Больцман, очень увлекались философией. Между ними произошла известная дискуссия (см. примеч. 14), рассказ о которой может показаться вам интересным.

Мах занимался перестройкой ньютоновой механики не в смысле создания другой, новой, теории, а в смысле иной интерпретации старой. В частности, он говорил, что вводить понятие силы нерационально: сила, по Маху, не является самостоятельной физической величиной, это просто произведение массы на ускорение. Иными словами он считал, что ньютоново уравнение движения  $F=ma$  — не более, чем определение левой части через посредство правой.

Ускорение можно точно измерить, наблюдая движение тел. Но на вопрос, что такое масса, нельзя дать конкретного ответа; говорят, что масса по своей природе присуща веществу. А силу, считал Мах, получают умножением ускорения на массу.

Мах хотел избавиться и от понятия массы. Его не удовлетворяло, что при наблюдении столкновения двух тел можно определить лишь отношение их масс. Когда-



то стандартным учебником механики была книга Кирхгофа. Я ее уже не застал, мы учились по книгам вроде аналитической механики Уиттекера. Так вот, Кирхгоф считал, что задача механики состоит лишь в точном описании движений всевозможных тел. Центральный пункт по Кирхгофу — описание. Это напоминает утверждение, что механика — не эмпирическая наука, а лишь ветвь прикладной математики, используемая для описания движений.

Наука вообще сначала проходит стадию классификации и описания и только потом может постепенно превратиться в теоретическую дисциплину. Для нас механика — теория, но говоря маховским языком, своей системой описания эта теория приводит к экономии мышления. В ней развиты методы, позволяющие не прилагать напрасных умственных усилий, вроде усилий на экзаменах, о которых мы говорили. Сам я не большой любитель экономить мышление. При напряженных занятиях физикой экономить мышление довольно тяжело. Как правило, мы трудимся очень неэкономно. Хотя, если дело спорится, затраченных сил не замечаешь. Поэтому, может быть, вы и не припомните случая, когда вам пришлось тратить силы неэкономно (*смех*). Но кто знает, может быть, жизнь интересна как раз тем, что бывают моменты, когда мы не экономим?

Как бы то ни было, по Маху можно говорить не более, чем об описании, и ньютонова механика — всего лишь схема, дающая точное описание реальных движений небесных тел. Разумеется, при создании такой теоретической схемы возникает много вопросов.

Философские работы публиковал также и Шрёдингер (я считаю его крупным философом). В одной из них он рассматривал проблему точности описания с помощью физической механики, например механики в формулировке Кирхгофа, и говорил, что при обдумывании подобных вопросов не покидает ощущение ужасающей пустоты.

Гейзенберг тоже имел склонность к философии. Философом был и Бор, но Бор-философ отличается от всех. И все-таки у Шрёдингера склонность к философии была выражена особенно сильно. Он окончил университет до появления квантовой механики. В 1925 г. (год этот очень интересен) в философском эссе, где он изложил свой взгляд на мироздание, Шрёдингер писал, что наука,

в которой мир только описывается и не решается вопрос, почему он устроен именно так, а не иначе, — пустая теория. Оказывается, он — талантливый физик, имевший очень хорошие работы по термодинамике, статистической физике, в действительности хотел заниматься философией. Будучи преподавателем университета, он читал лекции по физике, но рассматривал их лишь как способ заработать на жизнь (*смех*), а настоящее пристрастие имел только к философии.

Родился Шрёдингер в Австро-Венгрии, поступил учиться в один из университетов, но началась Первая мировая война, после которой по какой-то причине, кажется, в связи с появлением самостоятельных национальных государств, выделившихся из Австро-Венгрии, местность, в которой он жил, отошла к другой стране, и Шрёдингер перебрался в Цюрих. Там, как всем известно, он создал волновую механику. Всю жизнь Шрёдингер хотел заниматься философией, но из-за того, что он отложил эти занятия, физика стала совершенно иной. Поэтому, может быть, лучше не иметь возможности спокойно, без помех заниматься философией? (*Смех в зале.*) Человек часто не знает, что ему делать, к чему стремиться. Ведь если бы Шрёдингер посвятил себя философии, то еще не известно, стал бы он первоклассным философом или нет. Философия Шрёдингера интересна, но был бы ли он настолько же крупным философом, каким оказался великим физиком?

### Дальнодействие и близкодействие

Рассмотрим силу и движение. Мне не нравится, когда говорят, будто сила — величина вторичная, выводимая из других, более фундаментальных величин. Я не думаю, что открытие Ньютона сводится к определению силы. Я бы сказал, что он открыл связь между силой и движением.

В наше время понятие силы определено вполне четко, но так было не всегда, раньше этому термину придавали иной смысл. Например, известна большая работа Гельмгольца о сохранении энергии, написанная в XIX в. В то время термин *энергия* не применяли и в буквальном переводе с немецкого работа Гельмгольца называлась «О сохранении силы». Так что даже у Гельмгольца слово *сила* не имело того смысла, который мы придаем

ему теперь. Понятия силы и энергии стали четко различать после выхода в свет работы английского физика лорда Кельвина, посвященной энергии.

Оставляя в стороне историю термина *сила*, я сказал бы, что открытие Ньютона состояло в установлении связи между силой и ускорением — величинами, которые до него воспринимались как независимые.

Различают дальнодействующие и короткодействующие силы. В современной механике эти понятия не вызывают затруднений, а в прошлом вопрос о дальнодействии и близкодействии казался очень сложным.

По смыслу, сила, конечно, должна быть близкодействующей. Если я давя на стол, или вы давите на что-то сами, или испытываете давление, то все это случаи близкодействия. Сюда же относятся трение, сопротивление. Сила возникает при соприкосновении тел. Действие на расстоянии — явление таинственное. Наивно было бы думать, что это нечто вроде подмигивания (*смех в зале*). При подмигивании есть физический агент — свет, который отражается, встретив что-либо на своем пути. А вот если между вами совсем ничего нет и вы ощущаете действие как бы по нити, то это и будет истинным «действием на расстоянии» (*смех*).

Раньше в действии на расстоянии видели какую-то мистику и полагали, что его обязательно нужно сводить к близкодействию. Если между телами пустота, то ясно, что свести дальное действие к близкодействию невозможно; поэтому при одном из способов вывода дального действия из близкодействия говорили о распространении света, считая, что между телами находится эфир, передающий силу соседнему с ним эфиру. Свет тогда распространяется, как волна. Согласно другой точке зрения, тоже имеющей тесную связь с проблемой дального действия, свет состоит из частиц. При этом дальнодействующих сил не возникает, так как свет оказывает действие как по пути, так и в месте прибытия, и мы получаем одну из разновидностей близкодействия.

После Ньютона важнейшей силой стали считать силу всемирного тяготения. Она действует на расстоянии. Можно еще сказать, что это — сила мгновенного действия. Где бы ни находились два тела, между ними действует сила притяжения и не возникает вопроса о времени ее распространения. Даже если она и распространяется, то бесконечно быстро, и нет никакого промежуточного

агента, передающего действие силы. Можно было бы думать об эфире, но согласно атомной теории, признающей пустоту, между телами находится вакуум. И тем не менее непосредственно между ними действует сила. Это воспринималось как мистика. Возможно, вам так не кажется, но в те времена это выглядело очень загадочным.

Если я не ошибаюсь, Лейбниц возражал против дальнего действия именно в силу его мистической природы. Отстаивала дальнее действие школа Ньютона, в основном английские ученые. В конце концов восторжествовала прагматическая точка зрения о бесполезности эфира и ближнего действия, и при построении механики стали смело пользоваться именно дальнедействующими силами.

Девиз «Не думать о бесполезных вещах» господствовал до конца XIX в. Как относился к этому вопросу сам Ньютон? Он хотел свести дальнее действие к ближнему, и много думал об эфире, однако в те времена запись дальнедействующих сил через эфир выглядела бы чересчур сложно. Надо подчеркнуть, что именно Ньютон раньше других взялся за эту задачу, а его последователи отступили от нее и остановились на дальнем действии. Дальнее действие абсолютизировано не Ньютоном, но так как он избегал неясных высказываний, его размышления об эфире остались неопубликованными.

### Решение Максвелла

Что же случилось с задачей о дальнем действии и ближнем действии? Ее решение исходит от Фарадея и принадлежит Максвеллу. Но Максвелл дал решение для электромагнитных, а не гравитационных сил. С работ Максвелла началось возрождение сил ближнего действия (за основу было взято электромагнитное поле) и теперь «язык дальнего действия», по-видимому, забыт. Правда, изучение электромагнетизма мы начинаем с опыта, в котором маленькие кусочки бумаги подсказывают и прилипают к предварительно потертому резиновому стержню. Это — действие на расстоянии, выражаемое законом Кулона. Электростатическая сила, позволяющая понять такие явления, формально аналогична силе тяжести. При дальнейшем изучении электромагнетизма также встречаются формулировки с использованием сил дальнего действия, например закон Био—Савара. Интерпретация явлений с помощью дальнедействующих сил стала тради-

ционной в континентальной Европе. В XIX в. ею занимались в основном немецкие ученые, много сделавшие для развития ньютоновой механики. При таком подходе действующие между телами (массами) силы определяются расположением тел. При наличии электрического заряда сила имеет негравитационную природу, но по аналогии с силой тяжести ее тоже считали дальнедействующей.

Затем ситуация стала постепенно запутываться, но тут явился Максвелл. Его известное сочинение «Трактат об электричестве и магнетизме» (1873 г.) — солидный, обширный труд, и я читал его не слишком подробно. Думаю, полностью прочли эту книгу немногие. Предисловие к ней очень интересно. Вообще-то к неинтересной книге вряд ли можно написать интересное предисловие (*смех*). В предисловии Максвелл, основываясь на фарадеевой концепции действия через среду, дает толкование существовавшей до него теории дальнедействующих электромагнитных сил и подводит читателя к точке зрения на свет как электромагнитную волну. Его книга была написана как раз вовремя. Сформулированная в ней точка зрения полностью противоположна механическому подходу.

## ЛЕКЦИЯ 2

Продолжим разговор о ньютоновой механике. В этой связи я хочу снова подчеркнуть, что мои лекции — не введение в физику, а, скорее, размышления о физике и физиках. Говоря о завершенных разделах нашей науки, я пытаюсь показать их в процессе становления. Ведь смысл полученных результатов, как правило, ясен; не ясно, как до них додумываются? И если сам собираешься заниматься физикой, то вновь и вновь возвращаешься к вопросу, а как создавали науку в прошлом?

### Классификация ученых — одиночки, полемисты, коллективисты

Современных физиков-теоретиков можно разбить минимум на три группы. Правда, классификация эта довольно условна. Прежде всего, разделим их на одинок и тех, кто не любит одиночества. Среди общительных физиков сразу выделяются любители поговорить, поспорить, т. е. полемисты.

Одиночками были многие великие физики. Типичный одиночка — Ньютон. Много одиночек, настолько погруженных в размышления, что их воспринимаешь даже не как физиков, а как философов, было во времена Декарта. К этому же типу можно отнести Планка, Эйнштейна, Шрёдингера, де Бройля. Мне нравятся такие люди, жаль, что их число со временем уменьшается.

Следующая группа — полемисты. Это, прежде всего, Гейзенберг и Бор (о которых мы уже немного говорили) — активные участники дискуссий. Склонный к одиночеству Паули во время споров тоже не оставался в стороне. Эти люди годами вели важную полемику, напоминая споры далекого прошлого с участием Сократа и Платона. Греки любили поспорить. В частности, Аристотель, облакавший обычно свои беседы в форму диалогов, основал школу перипатетиков, беседовавших на научные темы во время прогулок. Правда, спорить на равных с таким великим всезнающим учителем, как Аристотель, было, надо думать, совсем не легко.

Еще одна разновидность теоретиков — коллективисты. Во мне они не возбуждают интереса (*смех в зале*), но ведь бывает, что они собираются в группы по необходимости? Если ставится опыт с использованием, скажем, современного ускорителя, то создается устрашающе огромный коллектив. При правильной организации коллектив быстро продвигает исследования. Хорошая обстановка может привлечь в коллектив очень способных ученых. Коллективизм — весьма современное явление, которое вы, думаю, знаете, лучше меня. Вернемся к спорщикам. Между греками и современностью мы видим Галилея. Любил ли он спорить, неизвестно, но среди его произведений, по крайней мере, два наиболее важных написаны в форме беседы, в которой участвуют трое: лицо, представляющее позицию автора, его оппонент и третий собеседник, точка зрения которого отличается от двух других. Спорят они очень искусно. Не исключено, что форма изложения в этих книгах отражала реальность, и какие-то споры в этом духе действительно происходили.

Важное достоинство полемики можно выразить словами *сильная обратная связь*. Обычно проблемы обсуждают с ученым примерно равной силы. Вы излагаете свою точку зрения. Если ваш собеседник согласен, то

спора не возникает. В противном случае вам придется выслушать мнение своего оппонента. Гейзенберг обычно обращался к Паули или Бору, замечания которых играли для него роль обратной связи. От Паули многие предпочитали держаться на почтительном расстоянии, опасаясь, что обратная связь с ним окажется отрицательной (*смех в зале*), но Гейзенберг дружил с Паули с юных лет и не принимал его выпады близко к сердцу. В конце концов они пришли к согласию по многим вопросам, но это произошло не сразу, а в результате долгой совместной работы. Подобное духовное общение — очень положительная обратная связь, по-моему, это чудесно.

Споры создателей квантовой механики — факт сравнительно нового времени, а классическая физика не знала такого стиля. Работы тогда имели «самозавершенный» характер, а типичные великие ученые той поры — Ньютон и Максвелл. О большом двухтомном сочинении Максвелла, в котором заложены основы электродинамики, я говорил на прошлой лекции. Чтобы написать свой труд, Максвелл на несколько лет оставил профессию в университете и с головой погрузился в работу. Отказавшись от должности, он терпел эти годы материальные лишения. Этот случай характеризует его, как крайнего одиночку, очень характерного для периода классической физики.

### **О пользе конференций**

Еще одна форма общения ученых — конференции. Важное место в истории физических конференций занимают Сольвеевские конгрессы (см. примеч. 24), первый из которых произошел в 1911 г., когда уже была теория относительности и еще не утвердилась планковская квантовая теория. Как ученый Планк тяготел к классической физике, но в то время он придерживался квантовой теории, а позиции классической физики отстаивали Лоренц и Эрэнфест.

Планк и Эйнштейн выступили на конгрессе с обоснованием квантовой теории, казавшейся очень странной физикам старшего поколения, в частности Лоренцу и Эрэнфесту. Какие выдающиеся люди спорили! Их дискуссии показали, что, оставаясь на позициях классической физики даже такой великий теоретик, как Лоренц, мог предположить для излучения лишь формулу Рэлея—Джинса. Всем присутствующим стала ясна необ-

ходимость принятия квантовой теории Планка, поскольку его формула верно описывала экспериментальные данные для излучения (см. примеч. 25). Но нужное для такого шага изменение образа мысли — дело трудное, и толчок к необходимому сдвигу в мышлении дал первый сольвеевский конгресс.

С сольвеевских конгрессов начались международные физические конференции. На первых конгрессах соби-  
рались главным образом европейские физики и число участников было невелико, но постепенно конгрессы становились все крупнее и изменялся, если можно так выразиться, тип ученых — участников встреч.

Но и среди новых участников конгрессов попадались одиночки, например де Бройль. Думаю, у него были причины работать обособленно. На одном из конгрессов его выступление жестоко разгромил Паули. В результате де Бройль стал избегать встреч с Паули и не был на последующих конгрессах. Я очень хорошо понимаю его душевное состояние (*смех в зале*). Надо ли ехать на конгресс, если там рискуешь подвергнуться нападению человека с плохим характером? У меня такой вопрос тоже всегда возникал. Но если не участвовать во встречах, то не будет обратной связи и придется строить ее самому. Я обычно прислушиваюсь к мнению других, т. е. строго говоря, одиночкой не являюсь. К идеалу подлинного одиночки гораздо ближе йоги из секты дзэн (*хохот*).

Разговор об одиночках и полемистах как-то нечаянно занял у меня много времени. Говоря короче, мне кажется, что в наше время оставаться одиночкой становится все труднее, а быть полемистом — не для японца, потому что жаркие споры западного образца не в наших обычаях. Слишком горячий спор может привести к ссоре, можно нечаянно обидеть собеседника, и естественно, что мы таких споров избегаем. На Западе этих проблем не возникает, наоборот, постоянные споры там сближают людей, делают их друзьями, там культивируется давняя традиция полемики — своего рода искусства, которому надо учиться. В японской культуре, в национальном характере японцев сильна тенденция к изоляции, одиночеству, но есть также явная склонность к коллективизму, а полемистом в Японии быть трудно. Советом подумать на эту тему и я закончу вступление к сегодняшней лекции.



## Пространство в ньютоновой механике

На прошлой лекции мы всесторонне обсудили ньютонову механику, говорили в частности и о пространстве. Нам кажется, будто мы хорошо знаем, что такое пространство. Но если разобраться, то видно, что, говоря о пространстве, мы или ссылаемся на структуру механики или исходим из своего повседневного опыта. Тела в физике можно представлять себе либо в виде материальных точек, либо твердых тел и считать, что они «погружены» в пространство. Это естественное представление восходит к Демокриту, считавшему, что мир состоит из атомов и пустоты, наличие которой и делает возможным движение тел. В прошлом такую точку зрения нельзя было ни доказать, ни опровергнуть; к ней относились как к удобной схеме размышлений.

Под пространством обычно понимают большое множество точек. В математике точечные множества организуют в одно-, двух- или трехмерные многообразия, но точку можно представлять себе также и как предел деления пространства на все более мелкие части. Я уже говорил, что точки пространства отличаются от физических тел. В случае физического тела можно спросить, что станет с его моментом количества движения  $L = mr^2\omega$  при уменьшении размеров тела. Из атомной теории известно, что эта величина хоть и мала, но конечна. Если частота  $\omega$  ограничена, то при уменьшении  $r$  момент количества движения  $L$  стремится к нулю. А при увеличении  $\omega$  возможно, что в пределе  $L$  примет конечное значение. На прошлой лекции я уже задавал вопрос, нельзя ли на этом пути прийти к чему-то вроде квантовомеханического спина (см. примеч. 26)? Конечно, между таким бесхитростным классическим подходом и квантовой механикой лежит пропасть, и не ясно, имеют ли указанные соображения хоть какой-то смысл. Сейчас об этом ничего нельзя сказать.

При рассмотрении пространства подобных вопросов не возникает. Точка по определению неделима, и хорошо известно, что в случае евклидова пространства никаких других неотъемлемых свойств она не имеет. Остается лишь вопрос о множественности математически возможных пространств, т. е. проблема единственности. Нет ли произвола при выборе пространства? Произвола, конечно, нет.

Тела часто считают материальными точками, т. е. изучают движение «предельных объектов», получающихся при неограниченном уменьшении размеров тела. Задача состоит в нахождении положения объекта в зависимости от времени. Для ее решения нужны координаты, например декартовы. Вводят радиус-векторы (см. примеч. 27) и оперируют с их длиной и направлением. Изучая механику, вы пользовались векторами, для евклидовой геометрии понятие вектора естественно. Разумеется, кроме евклидовой геометрии в механику вводят время, законы движения и разные предположения о силах.

### Из истории векторов

Реально физика развивается не так, как об этом пишут в учебниках. Хотя в целом ее развитие — процесс поступательный, но фактически он идет с большими отклонениями. Можно, конечно, проследить единую неизбежную тенденцию развития, и если видно, что некоторое открытие должно появиться, то скорее всего оно появится. Однако происходит это не всегда сразу.

Пример такого отклонения — векторы. Они удобны, использование их весьма естественно, и обычно думают, что ими оперируют давно. Но это неверно. Даже в книге Максвелла, о которой уже говорилось, вы не найдете векторных обозначений для производных в декартовой системе координат, с помощью которых обычно записывают полученные им уравнения. Это — вторая половина XIX в., но даже тогда векторная символика еще не привилась.

Гораздо раньше векторов в науку были введены кватернионы. Эти и в самом деле странные величины придумал Гамильтон. Создатели квантовой механики очень обязаны трудам Гамильтона (см. примеч. 28) и Лагранжа (см. примеч. 29), бывших не только физиками, но и превосходными математиками. Гамильтон творил в XIX в., но созданный им канонический формализм (см. примеч. 30) крайне полезен и сегодня. Кватернион (выражаемый с помощью четверки чисел — см. примеч. 31) и обычный вещественный вектор — совершенно разные понятия. Нашел ли кватернион сразу хоть какое-то применение — не знаю; скорее всего, в XIX в. его появление было преждевременным. Историей кватернионов я не очень интересовался, но знаю, что их

исследовали известные английские ученые Тэйт и лорд Кельвин. Последнему принадлежит большая книга «Кватернионы».

Несколько позже Гамильтона жил известный вам в другой связи американский ученый Гиббс. По моему мнению, из американских физиков он самый великий; правда, это утверждение не согласуется с другими оценками. Если бы американцы позволили, то я назвал бы Гиббса младшим Ньютоном. Вы спросите, почему? Всю жизнь он словно в башне из слоновой кости прожил в маленьком городке Нью-Хейвене и преподавал в Йельском университете. Работы его безупречны. Как и работы Ньютона, они, по-видимому, совсем не содержат неверных утверждений. Имя Гиббса прочно связано со статистической механикой, где наряду с больцмановской статистикой различают также статистику Гиббса (см. примеч. 32). Думаю, большинству из вас Гиббс импонирует. Больцман — он мне тоже нравится — напряженно боролся за признание своих идей, а Гиббс, сразу определив область своих интересов, разрабатывал статистическую механику спокойно, не ввязываясь ни в какую борьбу.

Но не о статистической механике хочу я здесь сказать. Сохранились записи лекций, прочитанных Гиббсом около 1880 г. в Йельском университете. Хотя векторы и не обозначались в них с помощью жирных букв (см. примеч. 33), но, насколько я знаю, там дано определение скалярного и векторного произведений и введены символы, соответствующие современным круглым скобкам, оператору набла и прочим, т. е., в сущности, впервые механика изложена на языке векторов. Этим вопросом занимался г-н Кавагути (ранее ассистент Института фундаментальных исследований при университете Киото, теперь — профессор кафедр физики высоких энергий в Университете Цукуба).

Идеи Гиббса об использовании векторов не получили немедленного признания. Например, уже упоминавшийся английский ученый Тейт утверждал, что пользоваться векторами неудобно. Нам это удивительно, мы, напротив, не видим, зачем нужны кватернионы, которыми увлекался Тейт, где они могут найти применение? Правда, с появлением квантовой механики некоторые прежде непонятные величины приобретают важное значение. В частности, матрицы, казавшиеся раньше очень

трудными для усвоения, в XX в. проникли даже в классическую физику.

Несмотря на оппозицию сторонников кватернионов, после Гиббса векторы стали широко применять. Так, на использовании векторов основано изложение механики во многих английских учебниках (кстати, в наше время применение векторных обозначений характерно именно для английских книг по физике). Язык кватернионов теперь уже не выдвигают на первый план. Да, история — любопытная вещь! Гамильтон, несомненно, был великим человеком. Так неужели он ошибся, просмотрев векторы и введя кватернионы?

Ведь как получается? Гамильтон придумывает заманчивую вещь (кватернионы) и возвращается к своим обычным делам. Криминала здесь нет — физика не могла бы развиваться, если бы все и всегда делали только привычное (в нашем примере, правда, необычное понятие введено в принципиальном месте — речь идет о форме записи механики). А спустя некоторое время после странного изобретения Гамильтона на сцене появились более естественные и удобные, чем кватернионы, величины — векторы. Однако при взгляде из XX в. обнаруживается, что кватернионы сильно напоминают спиноры, играющие важную роль в квантовой механике. Так может быть, при создании кватернионов Гамильтон смотрел далеко вперед?

### «Имена» точек пространства

Вектор обозначают либо одним символом  $\mathbf{r}$ , либо выписывают три его компоненты  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ; форма записи вектора одинакова в любой системе координат. Применение векторов в физике основано на том, что существуют физические величины, при изменении системы координат ведущие себя, как векторы.

Понятие вектора наиболее естественно вводится в евклидовом пространстве, ибо здесь справедлива теорема Пифагора и можно пользоваться ортогональными составляющими, а это удобно: ведь движения во взаимно перпендикулярных направлениях независимы. Совокупность трех ортогональных составляющих и образует вектор. Векторы распределены в пространстве, причем в декартовых координатах три компоненты вектора распределяются независимо друг от друга, а устанавливае-

мые между ними связи имеют смысл физических законов. В других системах координат соотношения между составляющими более сложные.

Находящаяся в пространстве материальная точка, как я уже говорил, движется, оставаясь сама собой. Ее перемещение можно рассматривать как в неподвижной, так и в движущейся системах отсчета (рис. 1). Поскольку точка та же самая, между ее радиус-векторами в двух системах отсчета должно выполняться соотношение  $\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{a}$ , где  $\mathbf{a}$  — вектор сдвига начала координат

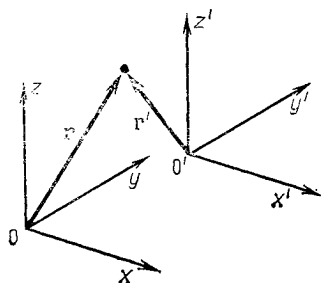


Рис. 1

движущейся системы отсчета относительно начала координат неподвижной системы отсчета. В противном случае язык пространства не был бы универсален.

Наша материальная точка переходит в места, где ее раньше не было, т. е. она последовательно совмещается с разными элементами точечного множества, играющего для нас роль пространства.

Как же мы будем различать

(идентифицировать) элементы (точки) пространства? Чтобы не употреблять столь трудно произносимого слова, как идентификация, будем говорить просто о наименовании точек. Смысл этих слов ясен: например, в системе координат, принятой нами за неподвижную, точка именуется тройкой чисел  $(x, y, z)$  независимо от того, находится в ней частица или нет. Любая точка евклидова пространства получит имя, если  $x, y, z$  изменяются от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

В другой системе координат имя рассматриваемой точки пространства задается тройкой чисел  $(x', y', z')$  — компонент радиус-вектора  $\mathbf{r}'$ . Взаимно однозначное соответствие разных имен одной и той же пространственной точки задается формулами вида

$$x' = x'(x, y, z, t); y' = y'(x, y, z, t); z' = z'(x, y, z, t),$$

в которые введено время, чтобы подчеркнуть, что имя дается точке в некоторый момент  $t$ , например  $t_0$ . Тем самым точки пространства полностью идентифицируются независимо от наличия материальных тел.

При относительном движении двух систем отсчета связь между именами, получаемыми пространственными точками в этих системах, зависит от времени. В частности, это приводит к тому, что частица, покоящаяся в одной системе, может выглядеть движущейся в другой, ибо перемещение частицы означает, что с течением времени изменяются имена пространственных точек, с которыми она последовательно совмещена.

Интуитивно мы уверены, что пространство существует независимо от наличия материальных тел, например, мы думаем, что пространство над поверхностью Земли не исчезнет, если из него убрать воздух. Из окон аудитории мы видим здания, но даже если бы их не было, мы все равно представляли бы себе «на их месте» пространственные точки, имена которых можно определить. Движущийся наблюдатель, например человек в поезде, определяет пространство, пользуясь собственной системой отсчета, в которой все выглядит иначе, чем для наблюдателя вне поезда. Различие их точек зрения сводится к тому, что они по-разному именуют точки пространства, т. е. применяют разные схемы идентификации пространственных точек.

### **«Реальные» и «фиктивные» силы**

Преобразования координат (имен пространственных точек) при относительном движении систем отсчета и формальное описание произвольных движений тел составляет содержание кинематики, с позиций которой движение как материальных точек, так и твердых тел полностью относительно, а преобразования, переводящие друг в друга схемы описания движений в разных системах отсчета, обратимы и симметричны. Об этом говорят, как о кинематической относительности. Равноценность систем отсчета перестает иметь место при переходе от кинематики к динамике, в которой вводят законы движения и силы. Тогда вследствие ускорения системы отсчета в ней возникают дополнительные силы, например кориолисовы (см. примеч. 34) или центробежные.

Для анализа этих дополнительных сил вводят так называемую абсолютную систему отсчета и разделяют силы на «реальные» и «фиктивные» (силы инерции).

Реальные силы по определению действуют только в инерциальных системах отсчета (см. примеч. 35), где

уравнения Ньютона имеют вид

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = f_x; \quad m \frac{d^2y}{dt^2} = f_y; \quad m \frac{d^2z}{dt^2} = f_z$$

(справа стоят реальные силы). Они определяют только ускорение, поэтому инерциальных систем бесконечно много. Написанные уравнения инвариантны относительно преобразования Галилея из-за того, что реальные силы, например сила тяжести, зависят только от разностей координат материальных тел; следовательно, все инерциальные системы отсчета равноправны, что выражает механическую относительность, не совпадающую с упомянутой выше кинематической относительностью.

В ускоренных системах отсчета в дополнение к действующим в инерциальных системах реальным силам добавляются силы инерции, которые, в отличие от реальных сил, не подчиняются третьему закону Ньютона о равенстве действия и противодействия.

### Об интерпретации Маха

Против деления сил на реальные силы и силы инерции возражал Мах, считавший, что механическую относительность нужно распространить на любые (а не только инерциальные) системы отсчета. Роль ускорения системы отсчета впервые экспериментально исследована в известном опыте Ньютона с ведром воды. Если сильно раскрутить ведро с водой, то уровень воды на краю станет выше, чем в центре, а ее поверхность примет форму параболоида. Существуют как сложные, так и простые объяснения этого явления. Проще всего считать, что при вращении ведра возникает центробежная сила инерции. Но можно представлять себе (по Маху), что существует действующий на расстоянии агент, «стаскивающий» частицы воды с окружности. Твердое ведро при этом форму не меняет, а поверхность воды легко деформируется.

Ньютон придерживался понятной и общепринятой теперь в классической механике интерпретации, считая вращение абсолютным в том смысле, что при вращении возникает центробежная сила, которую можно измерить. Но я хочу сейчас поговорить о другой, довольно странной, интерпретации, предложенной Махом, который утверждал, что увлекающая воду центробежная сила не

фиктивна, а создается реальными телами (см. примеч. 36).

Оставим ведро с водой и рассмотрим Землю. Ввиду суточного вращения на ней действует центробежная сила, которая хоть и не велика, но все же поддается измерению. Откуда возникает эта сила? Мах полагал, что вращение Земли происходит от вращения всего множества звезд.

Я не утверждаю, что такая точка зрения вообще не имеет смысла, но выглядит она очень странно. Казалось бы, разумнее считать, что вращается именно Земля, а звезды неподвижны. Тогда для объяснения центробежной силы достаточно учесть собственное вращение всего одного тела — Земли, и не нужно привлекать движение всего звездного неба. Однако Мах считал, что представление об абсолютном характере вращения Земли неприемлемо и для объяснения происхождения центробежной силы на Земле нужно рассматривать относительное движение Земли и всей Вселенной. Иными словами, он говорил, что центробежная сила не возникнет, если все множество звезд не придет во вращение.

Может быть, это и так, но поскольку нельзя устранить влияние звезд, доказать это утверждение невозможно. Фактически оно — пример софизма. Сторонник такой точки зрения должен ответить на вопрос, с какой силой все звезды воздействуют на Землю и, пользуясь представлением о вращении звезд, объяснить возникновение центробежной и кориолисовой сил.

Ясно, что сделать это не просто. При выводе придется пользоваться статической силой типа силы тяжести, из которой вряд ли можно получить очень динамичную, зависящую как от скорости тела, так и от угловой скорости вращения системы отсчета силу Кориолиса. Не утверждая, что такой вывод невозможен, скажу лишь, что дело это наверняка очень сложное, и поэтому теория Маха не представляется мне привлекательной. Более удачным я считаю общепризнанное объяснение Ньютона, обычно излагаемое в учебниках ньютоновой механики. Ценность этой механики, в частности, в том, что она, имея свои пределы применимости, органически входит в ряд более широких теорий, например в теорию относительности. Разве это не прекрасно звучит: вращательное движение абсолютно, движение с постоянной скоростью — относительно.



## Величие Ньютона

Постановка вопроса о центробежной силе — лишь эпизод в колоссальной деятельности Ньютона по созданию механики. И никто, конечно, не упрекнет его за то, что он не придал ей современную элегантную векторную форму, с него достаточно того, что своей механикой он заложил краеугольный камень физики. Обдумыванием физической картины мира занимались многие ученые после Ньютона; как для него, так и для них это было могучим источником интереса к нашей науке. Стремление утвердить новый взгляд на мир, создать новый образ мироздания — прекрасно, и мне кажется, что это компетенция физиков, а не философов.

Разумеется, Ньютон многое отсек у реального мира, о котором размышляют физики. Представителям других специальностей абстрактный характер механики Ньютона кажется крупным недостатком. Но это критика слабых духом, звучащая на любой стадии развития науки. Конечно, Ньютон абстрагируется, но он оставляет самое существенное и создает единую систему мира. Ему принадлежит, по крайней мере, построение теории солнечной системы. Это один из миров. Остается еще мир неподвижных звезд (наша Галактика) и множество других миров. В них он не успел разобраться, но солнечная система прекрасно воссоздана в рамках его механики. Думаю, что это крайне важный пункт.

### Об абсолютной системе отсчета

Наш разговор о ньютоновой механике подходит к концу, осталось обсудить уже затрагивавшийся вопрос об абсолютной системе отсчета. Вводя ее, Ньютон, конечно, понимал, что все инерциальные системы равноправны и ни в одной из них нет ничего особенного по сравнению с другой.

Вспомним, что Ньютон исходил из того, что мир создан всемогущим и всезнающим управителем — Богом. При такой точке зрения естественно считать, что существует абсолютная система отсчета, или, как еще говорили, абсолютное пространство. Наверное, все люди XVII в. думали так. Но Ньютон с его поразительной силой мысли и глубиной проникновения в анализируемые вопросы, я думаю, ясно различал множество равноценных инерциальных систем, находящихся в относительном

движении, и выделенную божеством абсолютную систему отсчета, а его необычная для физика религиозность объясняется неудовлетворенностью пусть безупречным, но формальным описанием устройства мира в механике, стремлением объяснить, почему мир устроен именно так.

Если принять, что абсолютная система отсчета существует, то возникнет вопрос, как ее разумно выбрать? В нее, конечно, надо помещать эфир, в противном случае (когда пространство — всего лишь пустота), как мы уже говорили, все системы отсчета равноправны. Из законов движения вытекает, что абсолютную систему отсчета надо искать среди инерциальных систем. Выбрать одну из них можно, либо считая, что пространство заполнено эфиром, либо по способу Маха.

Мах рассматривал большие (но не бесконечно большие) удаленные области космического пространства, содержащие достаточное количество разреженного вещества, и предполагал, что плотность вещества во Вселенной быстро уменьшается по мере удаления от наблюдателя. Тогда центр масс Вселенной будет расположен хоть и далеко, но на конечном расстоянии, и можно будет ввести систему отсчета, в которой он покоится. Ее Мах и считал абсолютной. Несомненно, что априори такая точка зрения возможна.

По другому определению, связанному с теорией эфира, абсолютная система отсчета — та, в которой эфир в целом неподвижен (в частности, не совершает колебаний). Такой эфир напоминает обычную сплошную среду, по сравнению с которой он очень разрежен (его плотность столь мала, что ее нельзя измерить). Эта пронизывающая все пространство субстанция в абсолютной системе отсчета совершенно спокойна, никакие ее части не движутся друг относительно друга. Определение абсолютной системы, основанное на теории эфира, просуществовало до конца XIX в. Сам Ньютон не решил задачу об эфире, но ее постановка стала возможной лишь после создания им механики.

### **О понятии поля**

На этом мы закончим обсуждение ньютоновой механики и перейдем к теории относительности, о которой будем говорить в прежнем стиле свободной беседы.

Вам, наверно, известно, что теорию относительности подразделяют на частную и общую. Об общей теории относительности мы подробнее поговорим на следующей лекции, а частная теория относительности тесно связана с равноправностью инерциальных систем отсчета, о которой мы уже говорили. Обсуждение этой теории мы, может быть, несколько неожиданно начнем с понятия поля.

В макроскопической физике существуют два фундаментальных поля — электромагнитное и гравитацион-

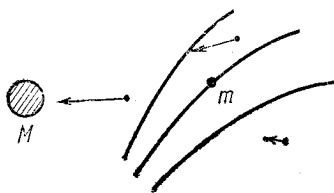


Рис. 2

ное; остальные ее поля выводятся из этих двух. В теории элементарных частиц добавляется много других фундаментальных полей; о них речь впереди. Электромагнитное и гравитационное поля — типичные представители полей. Но что такое поле вообще? Мнения

на этот счет различаются, я изложу обычные представления.

Частицу (материальную точку), занимающую некоторое место в пространстве, можно рассматривать как физическую метку этого места (этой пространственной точки). Частица движется, значит, есть свободные места. Помечены ли они? Нам недостаточно знать имена свободных пространственных точек, нужно пользоваться какими-то физическими метками. Ведь имена мы давали точкам произвольно, ничего о них не зная. И вот возникла идея метить незанятые материальными точками места пространства метками, имеющими физический смысл, т. е. использовать в качестве меток поле.

Понятие поля имеет отношение к обсуждавшейся нами проблеме дальнего действия и ближнего действия. Рассмотрим взаимодействие между Солнцем ( $M$ ) и Землей (рис. 2). Сила тяжести в промежутке между ними от места к месту меняется. По мере приближения к Солнцу она растет, а при удалении уменьшается. Этим можно характеризовать пространственные точки. Скажем, в точке  $A$  сила тяжести изображается вектором, направленным к Солнцу. В точке  $B$  она немного меньше (убывает обратно пропорционально квадрату расстояния).

Измеряя силу, мы определяем метку в пространстве, потому что векторы силы тяжести в нашем примере различны в разных пространственных точках и однозначно с ними связаны (абсолютное значение и направление этих векторов определяются расстоянием до Солнца и направлением на него). Вводимая так метка больше, чем имя точки, это — величина, которую можно измерить физически. Она всегда соответствует данной пространственной точке независимо от того, находится там Земля или какая-нибудь другая планета. Итак, силу притяжения Солнца надо понимать как метку точки пространства. Кроме силы, важное значение имеет потенциал тяготения. В данном случае он скаляр и сам по себе не может служить меткой точки. Но так как сила получается дифференцированием потенциала, он с точностью до производных тоже является меткой.

Таков общий смысл понятия поля. Несколько более земные, «человеческие» масштабы имеет электромагнитное поле. В этом случае каждой точке сопоставляют векторы **E** и **H**, которые тоже в каком-то смысле можно считать метками пространственных точек.

Очень важно, что поле может существовать независимо от присутствия вещества. С точки зрения классической физики поле, например электромагнитное, и вещество — разные физические объекты. Понятие вещества проще и ближе к наивному реализму, чем понятие поля, которое, в конце концов, выводится из идеи о силе.

### Поле в теории относительности

Знакомство с теорией относительности естественно начать с выяснения вопроса, что это такое, чем она отличается от ньютоновой механики. Думаю, вы знаете, что при переходе к теории относительности преобразования Галилея заменяют преобразованиями Лоренца (см. примеч. 37) и рассматривают четырехмерное пространство-время  $[(3+1)\text{-мерное пространство Минковского}]$ . Не останавливаясь на этих известных вещах, я хочу поговорить о моем личном восприятии теории относительности, моем собственном представлении о ней.

В теории относительности считают, что классическая (не квантовая) частица, так же, как в теории Ньютона, движется, оставаясь всегда сама собой. При движении

она описывает мировую линию в четырехмерном пространстве-времени (мире), т. е. в пространстве Минковского. Таким образом, мировая линия характеризует материальную точку, или объект, имеющий массу.

Другое важное понятие теории относительности — точечное событие, под которым имеют в виду следующее. Слово *событие* вообще означает, что что-то произошло. Его определяют указанием, когда и где это произошло.

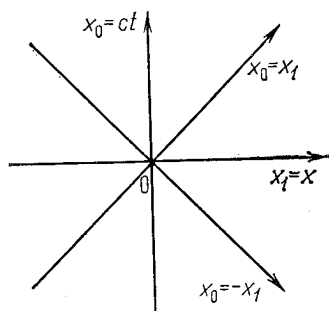


Рис. 3

*Когда* означает время, *где* — пространственную область, *что* — содержание события. Сказанное иллюстрирует рис. 3, где изображены момент времени и пространственная точка. Под событием можно понимать какую-нибудь реакцию с элементарными частицами. Но пока мы не пользуемся квантовым языком, а говорим о теории относительности в ее макроскопическом

понимании, событие может длиться в течение конечного интервала времени и происходить сразу во многих пространственных точках, а его содержание может быть совсем простым, например событие может означать, что в некоторой пространственно-временной точке изменилась напряженность поля, которым эта точка помечена.

Полем можно метить также и четырехмерные линии, задавая во всех пространственно-временных точках, например, электромагнитное поле **Е**, **Н**. Его изменения при ускоренном движении заряженных частиц будут событиями в данной точке четырехмерного пространства.

Вместо электромагнитного можно рассматривать гравитационное поле, например поле Солнца, действующее в свободной от тел пространственной области. Дополнив ее временным интервалом, получим пространственно-временную область, характеризуемую действующим в ней полем. Изменение поля играет роль события, а поскольку такое событие происходит в четырехмерной области, поле — существенно четырехмерное, а не трехмерное понятие.

Если событие (состоящее, например, в изменении электромагнитного поля) рассматривать в трехмерном

пространстве, как это делалось в ньютоновой механике, то его содержание будет зависеть от выбора системы отсчета, в которой оно фиксируется. Можно, сохраняя трехмерность, попытаться придать событию объективный смысл, вводя абсолютную систему отсчета, но для этого необходим эфир, проблематичность существования которого придает трехмерному пространству внутреннюю неопределенность. Поэтому в теории относительности рассматривают не трехмерное пространство, а четырехмерное пространство-время, имеющее ясную структуру, предложенную Минковским. Чем это не абсолютное пространство-время? Если в нем ввести декартовы координаты и установить часы, то окажется, что в любой инерциальной системе отсчета физические законы имеют одинаковую форму, т. е. инвариантны относительно преобразования Лоренца.

Таким образом, мы имеем единое четырехмерное многообразие, точки в котором помечены полем, а события имеют смысл изменений поля-метки. Поле может удовлетворять уравнениям Максвелла или уравнениям гравитационного поля, связывающим его значения в некоторый момент и в близкий к нему следующий момент времени. Некоторые из уравнений Максвелла связывают значения поля в пространственных направлениях. Итак, в каждой пространственно-временной точке задано поле, а его значения связаны соответствующим законом. Это обычная формулировка, даваемая в книгах по теории относительности.

### **Об ограничениях, накладываемых частной теорией относительности**

В частной теории относительности пространство-время имеет неизменную структуру (метрика Минковского), а физические законы инвариантны относительно преобразования Лоренца. Исходя из этого, легко строится, например, теория электромагнитного поля. В теории относительности из требования лоренц-инвариантности (имеющего не кинематический, а механический смысл) вытекает, что скорость частицы не может превышать скорость света, что приводит к некоторым затруднениям, одно из которых — вопрос о существовании частиц со сверхсветовой скоростью.

Другое затруднение связано с задачей о твердом теле. Я не намерен здесь рассматривать ее слишком подроб-

но. Под твердым телом в ньютоновой механике подразумевают недеформируемое тело: например, диск должен оставаться круглым для любого наблюдателя. Однако в частной теории относительности это невозможно. Если твердое тело (которое мы считаем абсолютно жестким) кажется круглым наблюдателю в системе покоя этого тела, то для движущегося относительно него наблюдателя оно будет выглядеть сжатым в направлении своего движения ввиду известного эффекта лоренцева сокращения. Твердое тело, с которым происходят такие вещи, не является твердым в обычном смысле, смысле ньютоновой механики. Правда, можно, изменив точку зрения, определить твердое тело с учетом лоренцева сокращения при равномерном прямолинейном движении. Ведь масштабные линейки делают из твердых тел. При измерении расстояния такой линейкой получается разный результат в зависимости от того, покоятся или движутся друг относительно друга линейка и объект. Движущаяся линейка короче.

Затем, возникает вопрос с часами. В каждой точке нужно иметь точные часы, показывающие всюду одно и то же время. Как этого добиться? Ведь согласно теории относительности часы у движущегося наблюдателя идут медленнее, чем у покоящегося, как будто тот, кто движется, опаздывает. И далее, в таком же духе, в теории относительности все не так, как в теории Ньютона. Вам это хорошо известно.

Подобных отличий от классической механики в теории относительности много, но в ряде отношений она на нее очень похожа. Например, как и в ньютоновой механике, здесь совершенно особое значение имеют инерциальные системы отсчета. Это следствие того, что пространство-время имеет структуру Минковского.

### **Причинность в ньютоновой механике — демон Лапласа**

В естественных науках наиболее фундаментальны законы, выражающие причинные связи. Есть, конечно, и другие законы, но они менее важны.

До зарождения современной науки (создания ньютоновой механики) понятиям причины и следствия придавали очень широкий смысл. Выдвигали самые разные источники движущей силы, но наиболее глубокой универсальной причиной движения считали божество. При

такой точке зрения причина и следствие одинаково важны, а их последовательность во времени несущественна. Ее, конечно, рассматривали, но не так, как в ньютоновой механике. Короче, считали, что существует одна, очень общая фундаментальная причина движения.

С созданием ньютоновой механики причину и следствие стали определять временной последовательностью, и их взаимоотношение сильно прояснилось. Если, например, на рис. 4 по оси абсцисс отложить положение материальной точки, а по оси ординат — время, то точка будет двигаться снизу вверх.

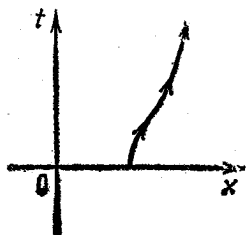


Рис. 4

Уравнения движения в ньютоновой механике заданы, но с усложнением механической системы, ростом числа степеней свободы система этих зацепляющихся уравнений становится крайне сложной, а ведь, кроме них, нужно еще задать начальные условия, т. е. начальные положения и скорости. Со-

стояние механической системы в некоторый момент времени определяется положениями и скоростями всех материальных точек, а ее будущие состояния однозначно определены дифференциальными уравнениями.

В такой ясной форме причинность ньютоновой механики впервые представил Лаплас. Он же придумал демона (о котором вы, может быть, слышали), имеющего две ужасные сверхчеловеческие способности — собирать предельно полную, исчерпывающую информацию и мгновенно производить любые вычисления. Лапласов демон знает все о состоянии в любой момент. Как он собирает информацию — из газет или телевидения, бюллетеней о деятельности правительства и промышленных фирм — неважно, во всяком случае, он способен собрать и полностью усвоить совершенно всю информацию. Так вот, в какой-то момент он знает положение и скорость любой частицы. Подставляя их в уравнения движения и решая, он узнает полностью все будущее. И не только будущее, но и прошлое: ведь уравнения Ньютона обратимы. Для этого достаточно изменить направление оси времени, и все прошлое станет полностью известно. Итак, демон знает все о нашем мире, и, кроме того, по своим вычислительным способностям



он значительно превосходит сотни тысяч самых высокопроизводительных ЭВМ.

Если бы такой демон существовал, то он знал бы все, все наши поступки и вызванные ими изменения. Скажем, я заболтался, вы вздремнули (*смех в зале*) — даже это, принципиально, входит во всеобъемлющее знание и, разумеется, будет предсказываться и получаться. Конечно, Лаплас не собирался определять, сколько будет спать какой-нибудь соня, но ведь если толковать проблему расширенно, то демон должен знать, в частности, и то, когда и где на следующее утро наш соня проснется. Причем результат не должен зависеть от воли этого соня. Но ведь соня может не пожелать подняться сразу, вдруг ему захочется еще поваляться? (*Смех.*)

### Лаплас и его эпоха

Согласитесь, жизнь в таком случае стала бы совсем неинтересной. Лаплас был прагматиком. Он популяризовал во Франции идеи Ньютона, развил аналитическую механику Лагранжа и очень продвинул вперед методы вычислений. В его эпоху приобрела важность задача об устойчивости солнечной системы (при Ньютоне эту задачу еще не поставили), возникающая в связи с учетом сложных взаимодействий между составляющими ее планетами, под влиянием которых последние слегка смещаются со своих орбит. Лаплас утверждал, что планеты возвращаются на свои орбиты, и в целом солнечная система очень устойчива.

Я не знаю, насколько строго он доказал свое утверждение. В то время астрономия получила большое развитие, а Лаплас — один из ведущих ученых — чувствовал себя в механике очень уверенно. Ее совершенство приводило Лапласа в восхищение, именно в этой связи нужно рассматривать придуманного им демона. Говорят, будто в один из великосветских приемов Наполеон, беседуя с Лапласом о механике, спросил: «Почему в вашей теории нет божества?», на что Лаплас ответил: «Государь, в этой гипотезе я не нуждался» (*смех в зале*).

Демон Лапласа — это не бог. Лаплас жил спустя примерно 100 лет после Ньютона, и за это время образ мысли изменился. Произошла французская революция,

Соединенные Штаты получили независимость, появился на сцене Наполеон, он пал и была восстановлена династия Бурбонов. И в такой переменчивой обстановке Лаплас прожил удачную жизнь. Чтобы выжить в такие времена, ньютонов стиль мышления никак не подходил (*смех в зале*), и Лаплас стал прагматиком, физиком-прагматиком. Думаю, поэтому он и занимался теорией вероятностей. В наше время эта теория очень усложнилась, а Лаплас закладывал ее основы, понять которые гораздо легче.

Наблюдения сопровождаются ошибками, и любые физические измерения не абсолютно точны, а содержат некоторые погрешности, поэтому явления реального мира не подчиняются ньютоновой механике в чистом виде. Механика реальных движений должна содержать элементы вероятностных законов. Лаплас, мощный ум, выживший в таком хаотическом мире, это очень хорошо понимал. Думаю, поэтому он и занялся теорией вероятностей. Впрочем, Гаусс тоже разрабатывал теорию ошибок. Может, я и не прав, но мне кажется, что во времена быстрых перемен, когда не известно, каким завтра станет общество, естественно появиться такому образу мысли, как теория вероятностей. Одна из простейших в теории вероятностей формула — для заключения пари при игре в кости — получена Паскалем. Садясь в самолет ... — ах, да, в те времена самолетов не было, — так вот, садясь в поезд, подвергаешь себя разнообразному риску, в связи с чем и было введено страхование. Исходящие в своей деятельности из теории вероятностей страховые фирмы не несут никаких убытков. Для пассажира вероятность катастрофы несколько сомнительна, но предстоящий путь нам не известен, когда и что случится, мы не знаем. И вот страхуемся: в конце концов, возможно, что когда-нибудь несчастный случай и произойдет, ведь вероятность не равна нулю.

Что-то я отвлекся на социальные темы. Но физическая ньютонова механика поточнее наук об обществе, измерения можно провести достаточно надежно. Правда, при переходе к сложным системам без теории вероятностей невозможно произвести реальных расчетов — ведь у нас нет лапласова демона.

Вслед за созданием теории вероятностей в XIX в. появилась кинетическая теория газов. Максвелл, Больцман, Гиббс развили статистическую механику. Понятие

вероятности, разумеется, находит широкое применение и вне физики, но для физики это важнейшее понятие. Особое значение оно приобрело после создания квантовой механики, в которую вероятность проникла в очень своеобразной форме.

Поэтому ... Но сколько можно об этом говорить? Похоже, моя речь начинает управляться случайностями (*смех в зале*), а стоит мне еще хоть чуть-чуть поболтать, как лапласов демон без труда вычислит, о чем я стану говорить в следующий момент (*смех*).

### О причинности в частной теории относительности

Я несколько отклонился от обсуждаемой нами темы — ньютоновой причинности. Это причинность, введенная Лапласом, вам хорошо знакомая. В частной теории относительности понятие причинности видоизменяется. Подробно об этом я говорить не буду, потому

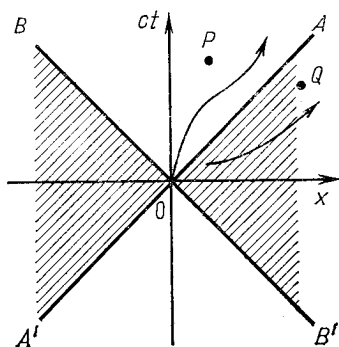


Рис. 5:

$B'O'B$ ,  $A'O'A$  — траектории светового луча. Если будущее определить как область, на которую можно оказать влияние из настоящего, а прошлое — как область, точки которой могут влиять на настоящее, то окажется, что заштрихованный участок не относится ни к будущему, ни к прошлому, это — настоящее в обобщенном смысле слова (см. примеч. 38, 81, 82)

что вам это тоже должно быть известно. Отложим по оси ординат (рис. 5) величину  $ct$ , где  $t$  — время,  $c$  — скорость света. Плоскость разбивается на четыре части. Нам вообще-то надо иметь пространство Минковского, но нарисовать его мы не можем и в качестве заместителя пользуемся евклидовой плоскостью. Чересчур доверяясь этой модели, можно наделать ошибок, но мож-

но рассуждать и безошибочно. Итак, будем внимательны и осторожны.

Мы говорим о причинности. Но каков физический смысл слов *причина* и *следствие*? Рассмотрим, пока в рамках ньютоновой механики, систему многих частиц. Каждая из них где-то расположена, куда-то движется — любая из ситуаций физически возможна. На связь между состоянием движения частиц и их расположением ограничений нет, так как безразлично, с какими частицы движутся скоростями. Но в частной теории относительности частица, выходящая, например, из точки 0 (рис. 5), не может покинуть пределы светового конуса (на рис. 5 световой конус расположен вне заштрихованной области). Она обязана двигаться внутри него. Прямолинейно или криволинейно, но она может двигаться только в этих пределах. Если бы она вышла за пределы светового конуса, то приобретала бы сверхсветовую скорость.

Частицы со сверхсветовой скоростью иногда вводят в теорию элементарных частиц, им даже дали специальное название — тахионы (см. примеч. 40). Еще до того, как о них стали говорить на Западе, тахионы всесторонне изучил проф. Танака (Университет в Киото). Задача эта имеет много важных аспектов, и при обычном полевом подходе в теории элементарных частиц тахион — сложный объект. Без знания квантовой теории поля говорить о нем невозможно.

Существование тахионов, несомненно, привело бы к трудностям в теории относительности, согласно которой частицы не должны двигаться быстрее света. Не будем подробно обсуждать эту проблему, ибо в действительности тахионов нет. Говорили об эфире, говорят о тахионе.

Вернемся к нашей теме. Источником, причиной изменений может быть как частица, так и поле, но для простоты заменим их материальной точкой. Объект, воспринимающий ее влияние (назовем влияние результатом, или следствием), поместим в точку  $P$  незаштрихованной области на рис. 5 (это времениподобная область, см. примеч. 81). О приходе частицы в точку 0 (начало отсчета) будем говорить как о причине, а о ее приходе в точку  $P$  — как о следствии. Поскольку частиц со сверхсветовой скоростью нет, заштрихованный участок (пространственно-подобная область, см. примеч. 81),

например точку  $Q$ , и точку  $O$  нельзя связать причинно-следственной связью. В этом смысле заштрихованный участок одновременен точке  $O$ .

Но что такое одновременность? В ньютоновой механике ответ ясен — одновременны точки на оси абсцисс, а в теории относительности эта линия вдруг расширяется в целую область. На первый взгляд, получилось что-то не то, но в действительности все просто. Дело в выборе осей  $x$  и  $ct$  (см. рис. 5). Откладывая величину  $ct$  по оси ординат, мы сильно искажаем привычный нам

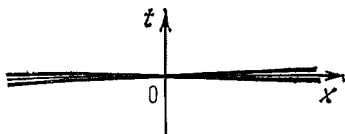


Рис. 6

из повседневной жизни баланс между временным масштабом и масштабом расстояний. Не будем вводить  $ct$  и напишем  $t$  (рис. 6). Например, на оси времени за единицу возьмем 1 с: куда за это время распространится свет? При масштабе 10 км/см свет, вышедший из начала координат, практически не отклонится от оси  $x$  на протяжении нескольких сот метров. При использовании обычных масштабов траектория света еще сильнее «прижмется» к оси  $x$ . В действительности ситуация, показанная на рис. 5, почти не имеет отношения к макромиру. Для повседневной реальности это пустое фантазерство. Макромир скорее характеризуется рис. 6, на котором пространственно-подобная область, естественно, практически совпадает с осью  $x$ . Это понятно и не нуждается в дальнейшем пояснении; разумеется, хорошо, что так получилось.

Однако вернемся к нашей гипертрофированной картине (см. рис. 5). Есть случаи, когда такая картина — не преувеличение: она может чрезвычайно упростить рассмотрение частиц, разогнанных до скорости, близкой к скорости света. Сам свет всегда движется с этой скоростью. Электроны приобретают околосветовую скорость при энергии несколько мегаэлектронвольт, вот почему рис. 5 удобен при рассмотрении микромира. Здесь закон причинности действительно получает довольно строгие

ограничения, о которых мы поговорим на следующей лекции.

Физический мир включает, с одной стороны, микромир, а с другой — бескрайние просторы Вселенной, так что даже при выборе в качестве единицы времени 1 с пространственный масштаб можно сделать невообразимо громадным. Например, звезда может быть удалена от нас на расстояние сотни тысяч световых лет. Мы видим, что на ней что-то происходит и думаем, что это — сейчас, а в действительности событие происходило там сотни тысяч лет назад. В таких обстоятельствах теория относительности тоже играет роль, правда, иную, чем в микромире. При переходе к огромным масштабам нужно говорить не о частной, а об общей теории относительности.

На следующей лекции мы рассмотрим также задачу о гравитации, до сих пор не решенную. В ньютоновой механике тяготение описывают скалярным потенциалом в трехмерном пространстве, производные которого дают вектор силы тяжести (см. примеч. 41). Но какова подлинная природа гравитации? Здесь очень ценен подход на основе понятия поля, позволяющий считать силу тяготения близкодействующей, как и принято в предложенной Эйнштейном теории гравитации — общей теории относительности. Иногда говорят, что у Эйнштейна гравитация и общая относительность — два проявления одной сущности, но это не единственно возможное мнение.

Большинство физиков дальше Эйнштейна не идет, считая, что задача о пространстве-времени решена окончательно. Предел познания ... Ведь даже то, что мы шаг за шагом углубляемся в свойства микромира, не оправдывает нашу беспечность в вопросе о структуре пространства-времени и не снимает обеспокоенности полным прекращением споров на эту тему. Проблема заморожена. Но далеко ли можно уйти в изучении микромира, не думая о пространстве-времени? Это большой вопрос, о нем мы тоже поговорим на следующей лекции. Во всяком случае, ясно, что вопрос о пространстве-времени в частной и общей теориях относительности решается по-разному, и некоторые даже полагают, что это различие непреодолимо. В частности, исследователи элементарных частиц не учитывают гравитацию. Сила тяжести действительно очень слаба и с прагматической

точки зрения при изучении микромира ее можно не принимать во внимание.

Но что сказать о различии подходов к пространству-времени в частной и общей теориях относительности? Ума не приложу, это Эйнштейн, не удовлетворенный частной теорией, придумал для своего успокоения общую теорию относительности (*смех в зале*), а наша мысль цепенеет при встрече с такой проблемой. Но я люблю свободу мысли, поэтому завтра мы еще раз поговорим об этом.

### ЛЕКЦИЯ 3

В конце прошлой лекции я отметил, что некоторые ученые видят глубокий, возможно, неустрашимый разрыв между частной и общей теориями относительности. Проблем общей теории относительности мы будем сегодня касаться неоднократно, в самой разной связи, а сейчас я хочу начать с квантовой механики, одной из основ теории элементарных частиц. Квантовую механику вы изучали и, конечно, знаете. Может быть, даже лучше меня (*смех в зале*).

#### Квантовая «теория» и квантовая «механика»

Я уже говорил немного о квантовой теории, точнее, ранней квантовой теории, которой в основном и интересуется широкий круг читателей. Правда, в период ее зарождения интерес к ней практически отсутствовал. Как ясно из названия, в начале была именно квантовая теория. Существуют *рон* и *гаку* (*смех в зале*)\*, но *рон* отличается от *гаку*. Слова эти имеют довольно широкое значение, в частности разный смысл можно вкладывать в слово *рон* (теория). Например, оно может иметь оттенок дискуссионности, с теорией иногда не все согла-

---

\* Здесь непереводаемая игра слов. В японском языке слово *рон* имеет двойное применение. С одной стороны, оно как суффикс входит в название теорий (например, *рёсирон* — квантовая теория, *сотайрон* — теория относительности), а с другой — может употребляться самостоятельно в значении *рон* — спор, дискуссия, обсуждение. Аналогично слово *гаку* может выступать либо как суффикс в названиях наук (например, *рикигаку* — механика, *рёсирикигаку* — квантовая механика, *сугаку* — математика), либо как самостоятельное слово в значении *гаку* — наука, знание. Юкава обыгрывает трудноуловимую разницу значения этих суффиксов. — *Прим. пер.*

шаются. В отличие от этого, слово *гаку* (наука, в данном контексте — механика) имеет более определенный смысл. Рамки механики четко очерчены, в частности, ясна область ее применимости, внутри которой она хорошо соответствует действительности. Механику можно излагать в учебниках. Преподавателям ее легко преподавать, а обучающимся — изучать.

Какой смысл вкладывают в слово *механика*, говоря о квантовой механике? Механика — вообще говоря, наука о силах. Но в физике она, кроме того, стала образцом завершенности области знания. Решая вопрос о том, называть ли что-либо механикой, в частности, смотрят, насколько установились там понятия. Образцом при этом служит ньютонова механика, в течение двух столетий выглядевшая абсолютно правильной и полностью законченной.

Но квантовая механика, надо сказать, механистична по самой своей сути в том смысле, что образ мышления в ней близок к образу мышления в ньютоновой механике. Я неоднократно отмечал характерную особенность «механического» образа мышления, согласно которому нечто, имеющее массу, рассматривают как твердое тело или материальную точку, подразумевая под этим маленькую частицу, размеры которой не существенны, а важно то, что она движется и что на нее действуют силы. Задача ньютоновой механики состоит в определении характеристик движения такого объекта.

В последующем физика развивалась под знаком этих идей. Конечно, законы движения в квантовой механике отличаются от таковых в механике Ньютона. В квантовой механике рассматривают уравнение Шредингера и гейзенберговские уравнения движения. Вы это, несомненно, знаете из учебников и лекций. Уравнения Шредингера и Гейзенберга, описывающие вещество с двух точек зрения, вполне эквивалентны друг другу. Гейзенберговское уравнение является уравнением движения в широком смысле слова, а уравнение Шредингера называют волновым уравнением.

### Волны: от эфира к полю

В связи с волновым уравнением остановимся на понятии волнового движения. Надо подчеркнуть, что движение вещества и движение волны — понятия разные. В прошлом авторы книг по классической механике всег-



да писали, что получающиеся при дроблении вещества атомы или несколько бóльшие тела движутся, не меняя своей природы, оставаясь тождественными самим себе. О каких-либо волнах при этом речи не было, имелось в виду простое перемещение.

Но что вообще означает понятие *волна*? В самом широком смысле оно характеризует колебательное движение большого числа тел. При этом, например, точка *A* может двигаться вверх и одновременно точка *B* — вниз. А затем, наоборот, точка *A* — вниз, а точка *B* — вверх. При волновом движении относительные положения тел могут синхронно меняться самым разным образом. В больших коллективах частиц или сплошном теле (являющемся предельным образом большого коллектива) волны совершенно неизбежны. То же самое можно сказать и об отдельном теле, если мысленно разбить его на части. Синхронное относительное движение таких частей или отдельных частиц большого коллектива можно рассматривать как волну.

В классической механике исходят из движения тел (частиц, материальных точек); когда их становится много, возникают волновые явления. Движение волны, вообще говоря, отличается от движения тела. Например, бросая в пруд камень, мы видим, как из одной точки кругами начинают расходиться волны. Прохождение волны сопровождается изменением формы водной поверхности, а частицы воды колеблются вверх-вниз и влево-вправо, при этом поток жидкости в направлении распространения волны, очевидно отсутствует. Волна — это явление. Ясно, что смешивать явление и вещество не следует. При рассмотрении вещества и явлений, возникающих при его движении, в физике на первое место ставят вещество и считают, что по отношению к веществу явление вторично.

Если, в частности, считать, что свет — волновое движение, то в качестве вещества, по которому бежит эта волна, надо рассматривать эфир. Эфиру, правда, приписывали исчезающе малую массу и очень большую упругость, но в сущности о нем думали именно как о веществе, отдельные частички которого, не изменяясь со временем, всегда остаются самими собой (см. примеч. 42). Такое же самосохранение во времени свойственно эфиру как целому. Свет — волна, бегущая по этой субстанции.

Вспоминаю, как во время учебы в школе повышенной ступени при изучении физики мы говорили о свете. У меня тогда возникало очень много вопросов и, хотя временами случались проблески, в общем я не очень хорошо понимал нашего учителя. Среди этих неясностей был вопрос об эфире, по которому, как я слышал, распространяется свет. Я думал, что это и в самом деле так.

Но думал так я потому, что недостаточно понимал теорию относительности. Понятие эфира в ней не вводится, и мне казалось, что отсутствие эфира надо понимать в том смысле, что волна проходит через места, в которых вообще ничего нет. Такое заблуждение естественно, и некоторые в самом деле так думают. Сомнения эти не случайны. Ведь в XIX в. без конца спорили о структуре эфира. И надо же — в следующем веке учебники стали строить так, будто об эфире никто никогда и не думал, а с самого начала все мыслили категориями теории относительности. Это очень странно. Изучать в школе евклидову геометрию естественно. Но начинать думать о свете сразу релятивистски, по-моему, затруднительно.

Мне кажется, ученика надо подготовить к резкому изменению взгляда на природу света. В чем должен состоять этот поворот? В учебниках обычно пишут только, что эфира нет. Но в каком смысле он отсутствует? Вместо утверждения, что эфира нет, лучше сказать, что отводившаяся ему роль теперь перешла к понятию поля, играющему роль физической метки пространственно-временных точек и позволяющему говорить о точках как о событиях. С помощью понятия об эфире, пронизывающем все области трехмерного пространства, нельзя было выбраться из клубка противоречий, легко снимаемых представлением о четырехмерном поле, введение которого разрешает, в частности, затруднения, связанные с опытом Майкельсона — Морли (см. примеч. 43).

### **Два вывода соотношения неопределенностей**

Вернемся к уравнению Шредингера. Это волновое уравнение. Есть еще эквивалентные ему уравнения Гейзенберга, записываемые в иной, чем уравнение Шредингера, приспособленной для описания движения частиц форме, которая напоминает канонические уравнения

Гамильтона (см. примеч. 44). Разумеется, гейзенберговские уравнения выражают другие законы природы, но, случайно или нет, их можно записать в таком же виде, как и классические уравнения. В классической механике вводят скобки Пуассона (см. примеч. 45), представляющие собой дифференциальную форму (от производных по  $p$  и  $q$ ) двух функций канонических переменных  $p$  и  $q$ . В теории Гейзенберга скобки Пуассона заменяются коммутатором. Например,

$$(p, q) \rightarrow [p, q] = qp - pq$$

(здесь нужно было бы еще домножить на  $\hbar$ , но это сведется к переобозначению константы).

Для получения уравнений Гейзенберга нужно в канонических уравнениях, записанных с использованием скобок Пуассона, заменить последние коммутаторами. В квантовой теории величины  $p$  и  $q$  — операторы, поэтому разность  $qp - pq$  не равна нулю.

Оператор действует на операнд. Операндом может быть, например, волновая функция Шредингера  $\psi$ . Все это вам, наверно, и слушать надоело. Во всех книгах об этом пишут. Волновой функции дана вероятностная интерпретация (см. примеч. 46).

Я не собираюсь вдаваться в детали, но о соотношении неопределенностей, вам, конечно, известно, все же скажу. В учебниках для его объяснения привлекают гамма-микроскоп (см. примеч. 47).

Обычно пишут

$$\Delta p \Delta q \gtrsim \hbar.$$

Я опустил множитель  $1/2$  в правой части, но суть здесь в том, что правая часть должна быть меньше левой.

Существуют два разных вывода этого соотношения. Первый предложен Гейзенбергом, это мысленный эксперимент по определению положения электрона с помощью микроскопа. При уменьшении длины волны излучения, освещающего электрон, возрастает точность определения положения ( $\Delta q$  уменьшается). Но при этом ввиду эффекта Комптона (см. примеч. 48) импульс электрона изменяется на неизвестную нам величину (возрастает  $\Delta p$ ). В итоге произведение  $\Delta p \Delta q$  не может стать меньше некоторого предела. На этом пути можно строго доказать соотношение неопределенностей. Такой

вывод — одна из его интерпретаций, обычно приводящаяся в учебниках.

При другом выводе исходят из волновой функции Шредингера  $\psi$ . Если принять, что  $\psi$  достаточно мала при больших значениях координат, то математическое ожидание (среднее значение) координаты будет приблизительно равно ее значению в той области пространства, где  $\psi$  заметно отлична от нуля. Пользуясь средним значением, можно, исходя из вероятностной интерпретации волновой функции, определить средний квадрат отклонения координаты  $(\Delta q)^2$ , квадратный корень из которого даст среднее квадратическое отклонение координаты. Выполняя такие же операции над импульсом, определяемым, как оператор дифференцирования по координате, умноженный на  $-\hbar$ , можно вывести соотношения неопределенностей (см. примеч. 49).

Я не уверен, что эти две интерпретации соотношения неопределенностей вполне эквивалентны друг другу. Скорее, они несколько различаются. При выводе с помощью гейзенберговского мысленного эксперимента рассматривают один электрон, находящийся в состоянии, когда по нему «ударяет» свет. При этом фактически пользуются дуализмом света как волны и частицы.

По своему этот вывод замечателен. Он утверждает, что неопределенный результат получается в каждом опыте. При выводе же с помощью волновой функции Шредингера интерпретация более привычна. Ведь  $\psi$  — амплитуда вероятности (см. примеч. 50), а понятие вероятности — статистическое. Нужно взять очень много электронов, каждый из которых находится в состоянии  $\psi$ , и делать выборки из этого ансамбля. Например, из ста тысяч электронов нужно выбрать тысячу и измерить их координаты. Результаты, естественно, получатся разные, и можно определить погрешность измерения, которая и даст значение  $\Delta q$ . Далее, из того же исходного ансамбля, содержащего 100 000 электронов, надо взять другую тысячу и измерить теперь импульсы. Вновь получим некий разброс значений. Все эти отклонения определяются волновой функцией  $\psi$ ; соответствующий вывод соотношения неопределенностей для произведения  $\Delta p \Delta q$  очень прост, не вызывает никаких сомнений, но ясно, что данная интерпретация отличается от интерпретации при мысленном опыте Гейзенберга. Вопрос о том, какая из них ближе к истине, остается открытым.

## Теория познания и физика

С математической точки зрения нам гораздо яснее статистическая интерпретация, так как в гейзенберговском подходе скрыты разные непростые вопросы. Во всяком случае, при сопоставлении математических абстракций с образом действий экспериментаторов при наблюдениях и измерениях гораздо легче рассуждать, придерживаясь статистического образа мысли. Для применимости статистики выборка должна быть достаточно большой. Но к счастью электроны доступны, их может быть сколько угодно. Не составляет труда приготовить совершенно одинаковые выборки, содержащие хоть сто тысяч, хоть миллион электронов, привести их с помощью соответствующих методов в одинаковые состояния и воспользоваться ими для доказательства соотношения неопределенностей. Статистическую интерпретацию волновой функции  $\psi$ , согласно которой  $|\psi|^2$  есть плотность вероятности, предложил Борн (см. примеч. 51), исходящий из анализа столкновений. Эта интерпретация близка шредингеровскому ходу мысли и не очень подходит для гейзенберговского мысленного эксперимента. Например, можно определить угловое распределение электронов, которые рассеяны мишенью, облучаемой катодными лучами. Со статистической точки зрения это будет распределение вероятности.

Для анализа гейзенберговского мысленного эксперимента нужны более сложные понятия. В частности, требуется боровский принцип дополнительности. На первой лекции я упоминал об автобиографии Гейзенберга, написанной в форме диалогов. Там много говорится не только об этом мысленном эксперименте, но и о других связанных с ним вопросах. Гейзенберг видит здесь глубокую теоретико-познавательную проблему. Я употребил термин *теория познания*, но нам нет необходимости вдаваться в такие сложности. Люди познают мир, разбираясь, как он устроен. С позиций ньютоновой механики мир устроен просто. Задача этой механики — не в познании мира, а в том, чтобы воспроизвести его средствами математики, что она и делает весьма успешно. В частности, в ней возникают кеплеровы орбиты, с помощью которых воспроизводится солнечная система. При формулировке ньютоновой механики приходится сильно абстрагироваться от действительности, например, совсем не учитывать замыслов и поступков людей. Лю-

дям лезут в голову разные посторонние мысли, они клюют носом на лекциях (*смех в зале*), занимаются науками и чего еще только не делают. Все это не входит в ньютонову картину мира. Теории познания в ней нет. Познание сводится здесь лишь к воспроизведению состояний. Скорее, это не познание, а описание. Полностью воспроизводится только одна сторона мира природы, соответствующая классической механике. В этом отношении весь реальный мир, с точностью до деталей, полностью соответствует решениям ньютоновых уравнений движения в определенных условиях. Вещь это простая, и привлекать сюда теорию познания нет необходимости.

В качестве инструмента познания внешнего мира прежде всего пользуются светом. В этой связи очень интересен вопрос: что такое свет? Но на первых порах лучше не думать об этом. Мы ведь, довольно бессознательно, просто видим предметы. Если же начать доискиваться, чем обеспечивается наша способность видеть, то придется строить довольно сложные теории — геометрическую и волновую оптику, на создание которых в физике ушло довольно много времени.

Возможно, вам не нравится геометрическая оптика (см. примеч. 52). Когда я слушал лекции в университете, мне она тоже казалась самым сухим и неинтересным из предметов. Но неинтересна она не сама по себе, а из-за неудачного стиля преподавания. Без конца комбинируют всякие линзы и ограничиваются материалом, знакомым уже по школьным учебникам. В действительности же геометрическая оптика объясняет многие жизненно важные вещи. Мы видим предметы только благодаря рассеянному свету и потому, что их поверхности не слишком плоские. Тело с идеально плоской зеркальной поверхностью, идеально отражающее свет, невидимо. Тела видны благодаря неровностям, масштаб которых может быть разным; при соответствующем масштабе поверхность делается шероховатой. Тело станет невидимым, если его поверхность идеально плоская на квазимикроскопических масштабах.

Стекло вон того окна вымыто не очень хорошо (*смех в зале*). На нем пыль, создающая неровности, из-за которых его и видно. Но пыли не слишком много, и сквозь стекло просвечивают здания. Если бы стекло было очень гладким и зеркально отражало свет или совершенно

прозрачным, мы бы его не видели ... это вам, конечно, понятно без всякой физики. Однако при тщательном обдумывании здесь возникает много сложностей. Геометрическая и волновая оптика могут описывать одни и те же факты, но при осмысливании их с позиций волновой оптики возникает много тонких проблем, думая о которых начинаешь понимать всю грубость рассуждений с диффузным отражением и линзами.

Я вновь отклонился в сторону от темы лекции. Переходить к квантовой механике всегда трудно, и я как бы оттягивал время. Правда, говорил я о своем личном опыте и надеюсь, что сказанное имело смысл.

### Расплывание электрона

Говоря об эфире, я коснулся своих школьных впечатлений. А в университете мне захотелось изучить квантовую и волновую механику. В те времена учебников по этим предметам, разумеется, не было, но выходило много статей, среди которых особенно трудными для понимания были статьи Гейзенберга. Уже после моего поступления в университет, в 1926 г., Борн, обобщивший эти статьи, издал книгу «Проблемы квантовой механики» (вскоре переведенную на японский язык), которая помогла немного разобраться в предмете. Прочитав ее, убедился, что книга очень хорошая. В ней излагалась гейзенберговская трактовка квантовой механики. Книга Борна вышла в канун появления волновой механики Шредингера. Борн писал, что физический мир пронизан скачками (разрывами непрерывности). Я тоже стал так думать. И тут появилась статья Шредингера, посвященная волновой механике. Ее тоже нужно изучить — решил я.

Эту статью Шредингера вы, скорее всего, не читали. Она не относится к ранней квантовой теории, а знаменует начало настоящей, серьезной квантовой механики. Но надо ли читать эту, пусть историческую и основополагающую, статью, если есть такие прекрасные учебники? ... Было время, когда одной из лучших считали книгу Дирака, а теперь, говорят, появились даже более удачные учебники. Я не знаю, какой из них лучше, может быть, Шиффа? Впрочем, мне ли оценивать современные учебники, в них ведь пишут в основном о проблемах, которые мне уже не по зубам (*смех в зале*). Здесь, конечно, тоже нужна тренировка. Но мне кажется

ся, что решаясь предпринять тяжкий труд изучения этих толстенных книг, важно еще и еще раз обдумать, как браться за дело. Поэтому я и говорю о своем собственном опыте изучения квантовой механики.

Шредингер думал, что его уравнение возвращает природе непрерывность. Иными словами, он придерживался волнового монизма (см. примеч. 53) и вовсе не имел в виду интерпретировать волновую функцию как амплитуду вероятности. В правильности открытого им волнового уравнения он убедился, обнаружив, что оно хорошо описывает атом водорода. Сначала он считал, что его волны существуют реально. Хотел так думать. Ведь существует же реально, например, свет. Конечно, такой субстанции, как эфир, символизирующий объективную реальность в старом смысле слова, нет и Шредингер хотел передать роль субстанции величине  $\psi$ , иначе говоря, он думал, что функция  $\psi$  и есть электрон. Эфир ввести не удастся, но нельзя же отказаться от электрона! А если  $\psi$  — электрон, то согласно волновому уравнению он должен иметь протяжение (см. примеч. 54), в противоречии с общепринятой точкой зрения. Как тут быть?

Сначала Шредингер рассмотрел гармонический осциллятор. Результат получился приличный, протяженность осциллятора — не очень большой; но волна электрона с самого начала была чересчур протяженной. Правда; картина электронного облака в атоме не слишком плоха. С точки зрения удаленного наблюдателя электрон группируется в довольно маленьком пространстве. Однако вне атома электронная волна распространяется на всю Вселенную, что явно не годится. Именно поэтому Борн и предложил вероятностную интерпретацию. Здесь мы устанавливаем связь с нашими прежними рассуждениями о вероятности.

И все-таки уравнение Шредингера, несомненно, правильное. Оно определяет волну, которая не является субстанцией, а имеет вероятностный смысл. Волна вероятности стремится к расплыванию, но при измерении положения электрона каждый раз оказывается, что он локализован в каком-то конкретном месте, и эффект расплывания не проявляется. Возможно, плохи наши способы измерения, но электрон всегда обнаруживают в какой-то точке. Говорят, что в момент измерения расплывшаяся волна вероятности сильно сжимается. Об



этом сжатии волнового пакета пишут во всех учебниках. Наблюдение электрона приводит к мгновенному сжатию расплывшейся волны. Даже если получающийся при измерении волновой пакет имеет какое-то протяжение, то оно очень мало. В то же время решение волнового уравнения показывает, что предоставленный самому себе волновой пакет быстро и неограниченно расширяется, а при новом наблюдении мгновенно возвращается в сжатое состояние.

Разве не удивительно такое мгновенное сжатие? Мне кажется, очень. Эта сложная проблема сводится в конце концов к тому, что измерения вносят сильные скачкообразные изменения в состояние системы. Получается, что уравнение Шредингера как бы страдает незавершенностью и не позволяет интерпретировать реальность в рамках непрерывных процессов. Наблюдение вносит разрывы в непрерывное течение природных явлений, вызывая быстрые изменения в удаленных местах. Можно ли сказать, что таким образом мы познаем природу? Если да, то это познание через чувственное восприятие, посредством ощущений. Даже если считать, что мы ее познаем, надо отметить отсутствие адекватного описания с помощью математических формул этого чувственного восприятия природы. В конце концов, здесь мы сталкиваемся с проблемой измерений.

### **Отход от классической причинности**

Мы вновь подошли к проблеме причинности. Известно три определения причинности — по Ньютону и Лапласу, в теории относительности и в квантовой механике. Закон причинности в квантовой механике сводится к утверждению, что волновая функция  $\psi$  изменяется согласно уравнению Шредингера. Иными словами, причинность здесь проявляется в зависимости волновой функции  $\psi$  от времени. Такое толкование означает, что мы отказываемся от старых представлений и приходим к вероятностной, статистической интерпретации причинности, при которой из нее устраняется детерминированность. Будущее теперь не предопределено. И если, например, при наблюдении электрона мы говорим, что нам что-то стало известно, то знание это, как ясно из соображений о сжатии волнового пакета, имеет эмпирический характер, это «знание наших ощущений». Где-то что-то произошло, и мы это восприняли. Квантовомеха-

нический принцип причинности не устанавливает между этими событиями причинно-следственной связи.

Многим физикам такая ситуация очень не нравится. Причинность в формулировке Ньютона и Лапласа всегда основывалась на физических законах, поэтому отсутствие детерминированности вызывает вопрос: а не отсутствуют ли у нас физические законы? Ведь сколько ни наблюдай недетерминированный объект, всегда можно думать, что в глубине его скрыто еще что-нибудь неизвестное. Такие сомнения были, в частности, у Эйнштейна. О Шредингере я сейчас не говорю, у него была своя позиция, а Эйнштейн, Подольский и Розен опубликовали статью, посвященную этим проблемам. Дискуссия Бора с Эйнштейном вокруг аналогичных вопросов длилась много лет (см. примеч. 12), но Бору не удалось убедить Эйнштейна в правильности своего образа мысли. Он писал, что это вызывало у него глубокое сожаление.

Тезисы Бора в этой дискуссии, разумеется, точно соответствовали квантовой механике. В ее пределах он говорил верные, совершенно безошибочные вещи. Во всем, что касается дополнителности, индетерминизма, проблемы измерений, точка зрения Бора верна и безошибочна.

Но Эйнштейну этот индетерминизм, неопределенность будущего казались большим затруднением. Неопределенность будущего напоминала ему игру бога в кости, и он старался найти какую-нибудь причину, запрещающую это. Как это бог может чего-то не знать? Бога сюда привлекать, конечно, не обязательно, но смысл того, что хотел сказать Эйнштейн, достаточно ясен.

Мнение о том, что точные науки невозможны без классических причинных связей, т. е. без детерминизма, существует давно. Не все разделяют такое мнение, и дискуссии на эту тему нам не безразличны. Эйнштейн был человеком номер один в науке, и он утверждал, что квантовая механика еще не полна. Я лично, учитывая ее индетерминистский статистический характер, не считаю квантовую механику неполной теорией. Но все же в этом вопросе остается какая-то неясность, и меня тоже не покидает ощущение, что где-то на новой стадии появится завершенная и полная, во всяком случае, несколько иная теория. Дискуссии о скрытых параметрах теории возникают время от времени и сейчас. Но по-

сколько, например, работы Боме (см. примеч. 55) на современной стадии развития квантовой механики не привели к каким-либо результатам, этот вопрос лучше сейчас не поднимать.

Понятие indeterminизма яснее всего иллюстрируется примером радиоактивного распада. Это очень indeterminированное явление наблюдали уже в конце XIX в. Пусть, например, множество атомов радия находится в одинаковых состояниях. Один атом распадется раньше, другой проживет дольше, но в целом радиоактивность будет уменьшаться статистически по экспоненциальному закону. Это естественно; но какой из атомов распадается раньше, а какой позже, мы не знаем. На практике пользуются числом распавшихся атомов и строят гистограмму (столбцовый график) распада. Будучи статистическим, это явление полностью indeterminировано. Правда, в то же время оно и очень объективно.

### Шрёдингеровский кот

Понятие объективного indeterminизма разъясняется с помощью придуманного Шрёдингером мысленного опыта с котом, который вам, наверно, хорошо известен.

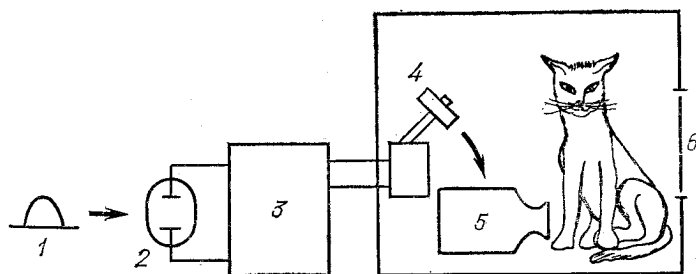


Рис. 7:

1 — радиоактивное вещество; 2 — счетчик; 3 — усилитель; 4 — молоток; 5 — ампула с синильной кислотой; 6 — смотровое окно

Пусть в ампуле (рис. 7) находится немного радиоактивного вещества, количество которого подобрано так, чтобы вероятность одного распада в час равнялась  $1/2$ . Рядом с радиоактивным веществом расположен счетчик. Распад радиоактивного атома вызывает разряд счетчика, разряд усиливается, срабатывает реле и опускается молоток. Под молотком находится ампула с синильной

кислотой. Итак, срабатывает счетчик, протекает ток, молоток падает и разбивает ампулу. Если в ящике сидел кот, то вскоре после испускания радиоактивного излучения распадающимся атомом кот погибает.

Индетерминизм в данном случае проявляется через посредство кота. Если заключить пари, выживет ли кот в течение ближайшего часа, то выигрыш определится чистой вероятностью, соответствующей выпадению орла или решки при бросании монеты. В принципе, конечно, можно было бы так искусно бросать монету, чтобы выпадали одни орлы (или одни решки). Тогда мы имели бы детерминированный процесс. Однако в действительности такая идеальная ловкость невозможна, и обсуждаемые случаи (бросание монет и опыт с котом) надо рассматривать одинаково, т. е. как индетерминированный процесс, поскольку результат в опыте с котом определяется событиями на микроскопическом уровне.

Правда, событиями на микроуровне определяется не все: есть и макроуровень. Например, пари можно заключать так. Кота вместе со всей установкой помещаем в железный ящик и по прошествии часа открываем крышку. Если кот жив, то выигрываю я, если нет — вы. Способ этот, конечно, неудобен: ведь выживание кота — явление макроскопическое. В наше время сделать заключение о смерти вовсе не просто (*смех в зале*); впрочем, и вопрос о сохранности ампулы тоже решается на макроуровне. Определить, жив ли кот, трудно, но, как видно, выяснять это и не нужно. Если же проследить цепочку событий вспять, то мы увидим, что начинается она с микроявления.

В свое время Иордан (соавтор Борна в известной работе Борна и Иордана, см. примеч. 56), занимаясь квантовой механикой, понял, какую большую роль она может играть в биологии. Им написано много книг. В частности, в 1930 г. Иордан выступил с утверждением, что животным свойствен механизм гигантского усиления. В таком-то смысле это, может быть и верно. В самом деле, допустим, кошка заметила где-то вдалеке мышь. Если это не современная, а прежняя кошка, то она в мгновение ока метнется — и мыши конец (*смех в зале*). Физическое воздействие со стороны мыши на кошку очень слабо — где-то далеко она еле мелькнула — и в тот же миг могучий бросок. Создаваемые людьми машины в целом намного менее чувствительны, хотя в некоторых

отношениях их чувствительность может быть гораздо выше, чем у животных. Живые существа действительно обладают механизмом гигантского усиления; ограничимся здесь только этим замечанием.

Вопросов биологии касались и другие физики. Бор обсуждал применение принципа дополнительности в биологии. А Шредингер обратил внимание на поразительную детерминированность жизненных процессов (в частности, сильно детерминировано явление наследственности). Изредка, правда, случаются мутации, но после них вновь устанавливается детерминированность. Шредингер писал, что детерминированность наследственности, по-видимому, обеспечивается очень большими и сложными молекулами. Эти идеи произвели большое впечатление на хорошо всем нам известного Крика. И вот Крик и Уотсон создали модель ДНК (см. примеч. 57). Поистине, замечания Шредингера о жизни оказали большое влияние на науку.

Шредингеру не импонировали индетерминизм в квантовой механике и отсутствие в ней непрерывности. Он придерживался волнового монизма, который в квантовой теории не проходит. И вот Шредингер обращает внимание на детерминизм жизненных явлений: здесь его детерминистические идеи (правда, это не полный детерминизм, поскольку использованы квантовомеханические соображения) одерживают верх над индетерминизмом сторонников Бора, ибо детерминированность жизненных явлений очень высока.

Итак, в квантовой теории непрерывность, детерминизм потерпели поражение. Квантовая механика — индетерминистическая теория. Бор попытался применить идеи индетерминизма к явлениям жизни. Но успеха добился Шредингер, выступавший с противоположных, детерминистических позиций, и преуспел он в области, где не был специалистом: оказался очень сильным пророком. Провал превратился в триумф, вещи перешли в свою противоположность, таких парадоксов можно указать много. Мы видим здесь борьбу противоположностей. Я как-то нечаянно затронул эти вопросы и вновь сильно отклонился от темы лекции.

## Завершение квантовой механики — квантовая теория поля

Возвратимся к моим студенческим годам, когда в 1927—1928 гг. я изучал квантовую механику. Тогда выходило много статей, и мне ничего не оставалось, как их читать, очень много читать. Теория Шредингера имела понятную интерпретацию и позволяла легко производить разные расчеты, поэтому созданная им волновая механика (нынешняя квантовая механика) стала очень популярной. Трудная статья Гейзенберга, конечно, была правильна, но ее понимали очень немногие. Что бы ни говорили теперь на разных научных заседаниях, но людей, понимавших эту статью, тогда почти не было. Ввиду понятности уравнения Шредингера все как-то сразу покорились ему, и оно получило самое широкое признание. Это, конечно, тоже парадоксально.

Сразу же попытались рассмотреть со шредингеровской точки зрения проблему многих тел, например, нескольких электронов. Волновая функция одного электрона зависит от переменных  $x, y, z$ . Когда электронов много, волновая функция зависит от координат всех частиц. Например, при двух электронах это волна в шестимерном пространстве, при трех — в девятимерном (см. примеч. 58). Конечно, теория не становится более фундаментальной оттого, что волна рассматривается в многомерном пространстве. Надо было также установить связь квантовой механики и теории относительности. Многочисленные попытки в этом направлении предприняли сразу после открытия уравнения Шредингера, но успехом они не увенчались. В чем же было дело?

Я тоже ощущал ненормальность положения и пытался разобраться. Но мне как студенту приходилось заниматься учебой, и светлые мысли посещали меня не часто. В то время я старался переформулировать проблему многих тел, не выходя за рамки трехмерного пространства. Пока я над этим трудился, появилась большая основополагающая статья Иордана и Клейна (см. примеч. 59), в которой они довели до успешного завершения метод, предложенный ранее Фоком. Статья оказалась очень понятной. В ней был развит метод вторичного квантования (см. примеч. 60), позволяющий свести многомерную задачу многих тел к трехмерной задаче за счет того, что волновая функция становится

оператором. Иными словами, она квантуется. Я стал обдумывать, как совершить здесь еще один шаг, но тут Дирак опубликовал работу, в которой он проквантовал излучение, т. е. электромагнитное поле. Фактически его работа повторяла статью Иордана и Клейна. Этим методом можно было проквантовать любое поле. Года через два вышла известная статья Паули и Гейзенберга о квантовой электродинамике (см. примеч. 61); к тому времени квантовая механика была в основном завершена. Все это вам, наверное, известно, но мне кажется, что при наличии времени неплохо было бы вернуться к этим вопросам и поговорить о них подробнее.

Все волновые поля существуют как поля в четырехмерном пространстве. Поэтому я рассматриваю еще одно (вторичное) квантование поля как способ выразить идею, что поле и частица — один и тот же объект. Разумеется, фотонам и электронам сопоставляют при этом квантованные поля, причем Бозе- и Ферми-статистика (см. примеч. 62) входят автоматически через посредство перестановочных соотношений между  $\psi$  и величиной, ей канонически-сопряженной; эти соотношения выражают статистические свойства поля.

Далее, возникает вопрос о связи спина со статистикой. В конце концов ее выразили в абстрактной форме как *CPT*-теорему (см. примеч. 63), но произошло это много времени спустя, а на ранней стадии связь спина со статистикой обсуждали с чисто физической точки зрения. Материал этот, по-моему, очень важен для тех, кто собирается самостоятельно развивать физику. Слушать лекции и заниматься, конечно, надо, но я думаю, что перечитать еще раз эти старые статьи было бы крайне полезно.

Вообще-то, обязательных курсов лекций должно быть поменьше (*смех в зале*). В современных университетах их слишком много — студентов водят за руку, как в детском саду. Хорошо бы принудительное слушание лекций заменить самостоятельной работой. Обилие обязательных курсов я рассматриваю как результат приверженности к теории об изначальной испорченности человеческой природы (*смех в зале*). Будто бы, если человеку дать свободное время, то он станет делать не то, что нужно (*смех*). И лучше уж запретить его в аудитории. В мое время педагогика исходила из противоположной доктрины, считая, что человеческая природа изначаль-

но добра (*смех*), домашних заданий вообще не было. При переходе в школу повышенной ступени я уже начал ощущать действие теории об изначальном зле, а в средней школе было еще очень хорошо. Мы слушали учителей, а придя домой, были предоставлены самим себе. Думаю, если человека не принуждать к занятиям, то дома он сам начнет заниматься (*смех в зале*), а если чересчур давить с преподаванием, то независимо от того, какой теории придерживаться — о зле или добре — все равно в результате привьется отвращение к учебе (*смех*). В любом случае лучше заниматься самому и не читать при этом слишком много книг. Вы спросите, почему? Если видишь, что в книге изложен результат, добыть который самостоятельно можно лишь с большим трудом, то не возникает охоты мучиться ради него самому, что плохо.

Но вернемся к нашей теме. Понятие квантованного поля использовали при создании квантовой электродинамики. Потом появились и другие теории, но все они — варианты квантовой теории поля. Получается, что ей мы должны быть очень благодарны (*смех в зале*). Каждая вновь открытая частица должна ежедневно кланяться квантовой теории поля (*смех*). Обнаружение новых элементарных частиц увеличивает число полей. Означает ли это, что развитие зашло в тупик? Если так, то мы с вами присутствуем при «кончине» физики. Но я все же думаю, что здесь найдется, что делать. В этой связи нам нужно еще раз обсудить понятие поля.

### **Квантовая механика и частная теория относительности**

Поле — почтенная, уважаемая четырехмерная квантованная физическая величина — адекватно представляет корпускулярные и волновые свойства и сжато выражает связь спина со статистикой. Понятие это очень содержательно, но с ростом числа элементарных частиц возрастает и число полей, что неудовлетворительно. Конечно, не о маховской экономии мышления я говорю, но все же число полей хотелось бы уменьшить. Кроме того, независимо от их числа, теория поля налагает на поля свои, довольно суровые ограничения. Есть, конечно, люди, которым ограничения нравятся. Например, вы, molecule, любите носить все тесное и узкое (*смех в зале*).

Одно весьма жесткое ограничение — ковариантность при преобразовании Лоренца — налагается частной тео-



рией относительности. Квантовая механика требует сохранения вероятности (унитарность), без чего невозможна вероятностная интерпретация. Все теории, допускающие такую интерпретацию, должны быть унитарными. Далее идет причинность, формулируемая с учетом частной теории относительности. Очень удачной была мысль посмотреть, какие поля удовлетворяют всем этим ограничениям. Ее появление знаменует конец «теории» элементарных частиц и начало их «механики» (*смех в зале*). Но пока механика элементарных частиц еще не создана, и вы не слишком опоздали родиться (*смех*).

Не боясь показаться однообразным, я не устаю повторять, что поле — четырехмерный объект, и потому поля не произвольны. На феноменологическом уровне на них налагаются ограничения двух видов — диктуемые квантовой механикой и связанные с теорией относительности (лоренц-инвариантность). Лоренц-инвариантность, или симметрия . . . (см. примеч. 66) . . . симметрия эта очень красива. Некоторые физики даже считают, что элементарные частицы по своей природе должны иметь предельно высокую симметрию. Гейзенберг — великий человек, но в этом отношении он, по-моему, перестарался. Я не стал бы слишком подчеркивать именно такого типа симметрию, хотя бы из-за существования общей теории относительности, сильно отличающейся от теорий, о которых мы сейчас говорили.

### **«Одинокая» и «возвышенная» теория (об общей теории относительности и общей ковариантности)**

Общая теория относительности, образно говоря, покоится на двух столпах. Я не буду здесь вдаваться в подробности (ведь общую теорию относительности вы уже изучали), а попробую лишь показать, что она — теория самого высокого класса, и подчеркнуть ее особенности, подтверждающие такую оценку. Коснусь также возможных связей общей теории относительности с теорией элементарных частиц.

Одной из основ общей теории относительности является идея об общей ковариантности. Встречаются физики, видящие в ней лишь формальное, не очень существенное условие. Говорят даже, что требование общей ковариантности физически бессодержательно. Эти ученые, конечно, не правы. Другая основа общей теории относительности — геометрия. Физика и геометрия всег-

да были тесно связаны, но общая теория относительности установила для этой связи новую форму. Таковы те два столба, на которых покоится общая теория относительности.

Общая ковариантность означает, что систему координат можно изменять как угодно. Ограничения на преобразования координат, конечно, есть, однако допускаются не только линейные лоренцевы, но и довольно произвольные нелинейные четырехмерные преобразования и требуется, чтобы физические законы при этих преобразованиях не изменяли своего вида. О величинах, связанных друг с другом формулировкой закона природы, говорят тогда, что они обладают свойством общей ковариантности. Примеры таких величин — векторы и скаляры. Со спинорами (см. примеч. 67) дело сложнее, но ввиду желательности общековариантного обобщения спина Эйнштейн ввел величину, напоминающую спинор по своим свойствам. Не знаю, насколько такое обобщение спинора полезно, но какой-то смысл в нем, видимо, есть. В физике известно несколько основных универсальных законов, имеющих объективный смысл; в общековариантной формулировке они выглядят одинаково в произвольной системе координат. Это последовательное, исчерпывающее выражение истинной сути наиболее глубоких, фундаментальных законов природы.

Но обычно об этом не думают, не придают значения тому, что Эйнштейн создал именно общую теорию относительности, а не только теорию гравитационного поля. Мнение о том, будто общая теория относительности — всего лишь вариант теории гравитации, я не разделяю. Возможно, она была бы бессодержательна, если бы, в частности, не давала теорию гравитации. Сам Эйнштейн придавал большое значение принципу эквивалентности (см. примеч. 68), который позволяет подойти к проблеме с единой точки зрения. Эйнштейн, конечно, очень не похож на обычных физиков: он не испытал полного удовлетворения от частной теории относительности и был ею настолько недоволен, что двинулся дальше. Ученый, не создавший по-настоящему нового, вряд ли будет так недоволен своим трудом (*смех в зале*), а сделанное другими вообще не оценит. У него все наоборот: свой собственный подход к делу ценит высоко, а каким путем идут другие, ему не важно — был бы результат, а как он добыт — всего лишь факт чужой биографии

(смех в зале). Знания современного физика сравнимы со знаниями Ньютона, но ведь Ньютон, как и Эйнштейн, «добыли» их сами, огромным трудом, и на это им потребовалась чуть ли не вся жизнь.

Надо осознать, что принцип эквивалентности — одна из основ общей теории относительности. Иногда роль этого принципа преуменьшают, считая, что без него можно было бы обойтись. Такой точки зрения придерживался, например, Фок. Я с ним решительно не согласен. В отличие от принципа эквивалентности свойство ковариантности напоминает утверждение о симметрии, как будто бы речь идет о разновидности очень жесткой симметрии. Правда, в применении к общей ковариантности термином «симметрия» не пользуются, ему придают несколько иной смысл. Среди других физических теорий общая теория относительности стоит особняком. В начале прошлой лекции я разделил ученых на одиночек, полемистов и т. д. Если применить эту классификацию к законченным физическим теориям, то общую теорию относительности можно было бы назвать «теорией-одиночкой». Надо сказать, и нравится-то она главным образом ученым-одиночкам (смех в зале) в силу своей изолированности. Но в ней заложены потенции глубокой связи с другими областями знания, и, я думаю, ей суждена долгая жизнь.

### Отождествление физических и геометрических величин

Мы говорили уже, что одна из основ общей теории относительности — геометрия. Гравитация здесь — больше, чем просто поле силы тяжести. Входящий в теорию тензор  $g_{\mu\nu}$  — физическая величина, определяющая, вообще говоря, метрику пространства-времени; но в общей теории относительности доказывается, что одновременно  $g_{\mu\nu}$  связан с силой тяжести (гравитационным полем). Эту двоякую роль  $g_{\mu\nu}$  нужно особенно подчеркнуть. Не знаю, есть ли в истории физики другой, аналогичный, пример связи с геометрией (в данном случае с римановой геометрией — см. примеч. 69). Вариантов римановой геометрии может быть много, и было неизвестно, соответствуют ли они действительности. Великая заслуга Эйнштейна состоит в выводе о том, что среди римановых геометрий есть одна, согласующаяся со структурой

реального пространства-времени, т. е. с наблюдаемой силой тяжести.

Я думаю, что творческая активность человека проявляется в способности увидеть тождество понятий там, где его никто не видит, и она тем выше, чем глубже устанавливаемая между понятиями связь. Примеров высокой творческой потенции, проявившейся в установлении глубоких связей, можно привести много; я хочу остановиться на формуле Больцмана  $S = k \ln W$ , в которой  $S$  — энтропия (см. примеч. 70);  $k$  — постоянная Больцмана;  $W$  — число микросостояний, соответствующих определенному макросостоянию, т. е. статистический вес. Меня эта формула всегда восхищала. Энтропия — макроскопическая величина, ее приращение определяется как деленное на абсолютную температуру приращение количества тепла, соответствующее заданному изменению энергии системы. И Больцман сумел выразить ее через микрохарактеристики системы. Это поразительно. Статистический вес связан с вероятностью и с появившимся позднее понятием информации. Формула Больцмана утверждает, что две родственные величины тождественны друг другу. Мы воспринимаем их как родственные теперь, после того, как Больцман указал на это. Самому же Больцману и его современникам они казались совершенно различными, не имеющими между собой ничего общего.

При создании общей теории относительности ситуация была отнюдь не яснее. Величины  $g_{\mu\nu}$  имеют геометрическую природу, и не было никаких указаний, что они родственны силе тяжести. Тем не менее это родство было установлено. Произвести такое отождествление очень трудно. Конечно, теперь, когда дело сделано, можно сказать, что суть здесь в принципе Маха, для выражения которого достаточно перенести левую часть уравнений движения Ньютона направо. Но говорить так легко, когда вопрос полностью выяснен, а сделать все впервые самому — совсем другое дело.

### **«Вместилище» (пространство-время) и «содержимое» (вещество)**

Мы говорили о геометрии и физике, но ведь можно встать и на такую точку зрения, что кроме них существует еще пространство — четырехмерное многообразие (пространство-время), «наполненное» разными физиче-

скими объектами, среди которых могут быть, например, материальные точки. Нет ли других физических теорий (кроме общей теории относительности), описывающих взаимосвязи в таком четырехмерном мире?

Конечно, есть. Пространство-время в таких теориях мыслится в виде жестких неразбиваемых рамок, играющих роль вместилища для энергии, т. е. вещества. Там, где есть энергия, есть и элементарные частицы, которые в квантовой теории поля (теории очень высокого уровня) представляются квантованными полями.

Вместилище это (пространство-время Минковского) неразрывно связано с частной теорией относительности. На изменение его природы наложено самое настоящее табу. И действительно, изменить здесь что-нибудь невероятно трудно. Я это хорошо знаю, потому что сам не раз пробовал (*смех в зале*). Но ведь должна же как-то эта задача решиться? И множится число попыток (разумеется, неудачных) что-то сделать (*смех*).

Подход в общей теории относительности совсем другой. Структура пространства-времени здесь определяется величиной  $g_{\mu\nu}$  (метрическим тензором, см. примеч. 71). Точно излагать детали я не буду, но, грубо говоря, в разных точках пространства-времени находится вещество, плотность энергии и импульса которого выражается симметричным тензором, и этот тензор приравнивается тензору кривизны пространства. Сказано это не совсем точно, но суть в том, что роль вместилища отводится тензору кривизны, построенному из производных метрического тензора  $g_{\mu\nu}$ , а роль содержимого — тензору энергии-импульса вещества. Правда, вместилище это нетривиальное, ибо присутствие вещества изменяет структуру пространства-времени.

Структура такого пространства-времени определяется тем, что масса движется по геодезической (кратчайшему пути, см. примеч. 72). В искривленном пространстве-времени искривлены также и геодезические. Например, на сфере кратчайший путь — не прямая линия, а дуга окружности большого круга. Тензор кривизны — понятие чисто геометрическое.

Но что такое геометрия? На первый взгляд, к геометрическим свойствам надо относить те, которые не зависят от выбора системы координат. Однако должен признаться, что я не очень хорошо понимаю связь физики с геометрией. Мне не ясен труднейший со времен

Ньютона вопрос о вращении тела, происходящего, естественно, в некоторой системе отсчета. Уже в задаче о вращении ведра с водой возникали разные сложные вопросы. Настороже нужно быть даже с самой вращающейся системой. Допустим, преобразованием координат мы перешли во вращающуюся систему отсчета. Казалось бы, геометрические свойства при этом не должны измениться. Но, похоже, это не совсем так.

Пусть, например, диск вращается с большой скоростью (рис. 8). При этом произвольная его точка движется в направлении по касательной к окружности; следовательно, в направлении касательной происходит лоренцево сокращение. В радиальном же направлении лоренцева сокращения нет. Это значит, что отношение

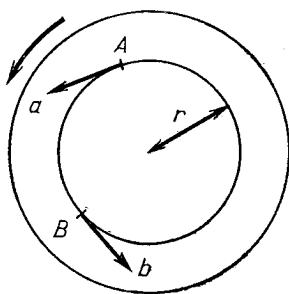


Рис. 8:

точка  $A$  движется в направлении стрелки  $a$ , точка  $B$  — в направлении стрелки  $b$ , и в этих направлениях происходит лоренцево сокращение. Следовательно, если, отправляясь из точки  $A$ , совершить один оборот, то, хотя направление и изменится на  $360^\circ$ , длина дуги не будет равна  $2\pi r$

длины дуги к радиусу изменяется по сравнению со случаем, когда диск покоится, и становится несправедливой евклидова геометрия, иными словами, геометрия изменяется. Вроде бы все так, но возникает вопрос — что же такое переход во вращающуюся систему отсчета? Ведь если это простое преобразование координат, то геометрия изменится не должна? Надо сказать, мне это не очень понятно. В самом деле, с одной стороны, простое преобразование координат, а с другой — нельзя найти тела (напоминающего вращающееся тело из ньютоновой механики), которое этому преобразованию координат вполне соответствовало бы. Я заглядывал в самые разные книги, но нигде не нашел ясного ответа

на свой вопрос \*. Правда, с дальнейшим изложением этот вопрос никак не связан.

**Верно ли, что общая теория относительности  
не имеет отношения к микромиру?**

Итак, можно поставить вопрос: существует ли связь между вмещением (пространством-временем) и его содержимым (веществом и энергией) в микромире, где пространство-время заполнено элементарными частицами или их «составляющими» — урбарионами (см. примеч. 73) и кварками (см. примеч. 74)? Может быть, в микромире этой связи нет? Причиной ее отсутствия могла бы быть крайняя слабость гравитационного притяжения элементарных частиц. Но действительно ли отсутствует такая связь? Я сказал, что ее можно было бы считать исчезающе малой вследствие слабости гравитационного взаимодействия.

Но кроме слабости последнего нужно учитывать еще следующее. Гравитационное поле описывается уравнением Эйнштейна (см. примеч. 75), в правой части которого стоят величины, связанные с веществом. На микроуровне вещество представлено квантованным полем, и возникает вопрос, какой смысл имеет здесь гравитация? Если допустить, что идея о гравитации на микроуровне разумна, то в правую часть уравнения Эйнштейна нужно подставить тензорную плотность энергии-импульса большого числа элементарных частиц — квантованную величину, выражаемую оператором. Следовательно, и левая часть уравнения должна быть квантованной. Конечно, способ квантования ее не прост. Иначе говоря, тензор  $g_{\mu\nu}$  или его производные, входящие в левую часть, нужно выразить квантовым оператором (см. примеч. 76). Проквантовать гравитацию пытались многие. Как сделать это фактически — другой вопрос, но суть состоит в квантовании гравитационного поля. Ес-

---

\* Возникшее недоумение можно снять, уточнив используемые понятия. Геометрические свойства четырехмерного пространства-времени при преобразованиях четырех координат (пространственных и временной) сохраняются (именно так обстоит дело при переходе во вращающуюся систему отсчета). Однако автор переходит к обсуждению трехмерного пространства, представляющего собой сечение четырехмерного пространства-времени, которое зависит от выбора системы отсчета. Свойства такого пространства изменяются при преобразовании четырех координат. — *Прим: пер.*

ли совсем упростить проблему, то дело сведется к определению процедуры квантования  $g_{\mu\nu}$ , а это уже совсем другое дело: в результате квантования возникнут отличия от макроскопического описания.

В разложении Фурье величины  $g_{\mu\nu}$  для нас теперь существенны члены с очень малыми длинами волн или, что то же, с большими волновыми числами. При квантовании используют понятие гравитона (см. примеч. 77). Не знаю, нужно ли вводить для него специальный символ. Уравнения гравитационного поля сильно нелинейны, но ввиду слабости поля надо пользоваться линейным приближением. Гравитону присущи корпускулярные, дискретные свойства, проявляющиеся тем сильнее, чем меньше длина волны. Этим он отличается от прежней классической непрерывной величины. Тензор  $g_{\mu\nu}$  не является больше обычной непрерывной функцией пространственно-временной точки, теперь это сложный объект, обладающий квантовыми операторными свойствами. А как обстоит дело с самим пространством-временем? Обычная формула для интервала между двумя точками

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

очень хорошо применима в макромире, мире больших, космических, масштабов. Ею пользуются при получении решения Шварцшильда (см. примеч. 78), с ее помощью предсказаны такие удивительные объекты, как черные дыры. Короче, она хороша для макромира.

Соответствующая теория отличается от частной теории относительности хотя бы типом симметрии, которая, вообще говоря, не сводится к лоренц-инвариантности, т. е. к симметрии относительно смещений и четырехмерных поворотов. Тип симметрии теперь заранее неизвестен. Возможны разные варианты. В зависимости от своего содержимого вместилище может принимать самый причудливый вид, и его симметрия, вообще говоря, не проста; не ясно даже, в какой мере можно говорить здесь о симметрии, скорее, речь должна идти о некоей очень общей универсальности. Это одна сторона дела. Другая связана с тем, что при переходе ко все более мелким разбиениям пространства-времени под символом  $d$  в величинах  $ds$  и  $dx^\mu$  мы должны подразумевать бесконечно малые приращения, но в действительности



приращения эти не бесконечно малы. Какие там бесконечно малые, речь идет об ужасно больших, огромных приращениях. Например, в упоминавшихся космологических задачах, несомненно, можно принять, что  $ds$  имеет порядок радиуса Земли. Мы возвращаемся, таким образом, к «человеческим» масштабам, а нам надо продолжить разбиение еще дальше. Но что получится при переходе к микромиру?

Ответ на этот вопрос совершенно не ясен. Казалось бы, под  $dx^\mu$ ,  $dx^\nu$  теперь нужно понимать именно дифференциалы, а тензор  $g_{\mu\nu}$  и вместе с ним  $ds^2$ , как уже говорилось, должны иметь операторные свойства. Тогда очень малые, микроскопические участки пространства-времени будут отличаться как от обычного пространства Минковского, так и от риманова пространства. Казалось бы, думать так естественно, но что будет на самом деле, неясно: то, что я сказал — одна из возможных экстраполяций. До сих пор этот вопрос не вызывал большого интереса, и этому есть свои причины. Считают, что о гравитационном поле можно говорить только на макроуровне, а к микромиру это понятие не имеет отношения из-за крайней малости постоянной гравитационного взаимодействия.

В любом случае возникает вопрос, не станет ли неприемлемым само представление о четырехмерном многообразии пространства-времени? Если оно непригодно, то начиная с какого-то момента теряет смысл величина  $g_{\mu\nu}$ . В космических масштабах это понятие применимо очень хорошо. Так, когда при постепенном уменьшении масштаба, тензор  $g_{\mu\nu}$  утрачивает смысл? И если величиной  $g_{\mu\nu}$  пользоваться нельзя, то какую ввести для нее замену? Пока физику с геометрией удалось связать лишь на макроуровне. Ситуация, когда эта связь теряется, не рассмотрена. Ответ на вопрос, чем можно заменить понятие непрерывного четырехмерного многообразия, по-видимому, как-то связан с квантованием. В результате должна исчезнуть непрерывность. То, что здесь может быть построено, вероятно, нельзя даже называть геометрией. Если все же говорить о геометрии, то, может быть, в форме статистического ансамбля римановых пространств с различными  $g_{\mu\nu}$ ?

В конце концов, все эти вопросы сводятся к одному.

Попросту говоря, проблема пространства-времени состоит в том, нельзя ли как-то ввести дискретность, причем в форме, пригодной только в условиях микромира? Думаю, что в такой осторожной формулировке проблеме действительно можно поставить. На этом я закончу обсуждение вопроса о связи общей теории относительности с микромиром.

### Теория элементарных частиц — локальные и нелокальные поля

Наконец-то мы подошли к теории элементарных частиц. Не нужно думать, что она тождественна квантовой теории поля. Теория элементарных частиц развивается с учетом ограничений, вытекающих из частной теории относительности и квантовой механики. В такие рамки попадает, конечно, и квантовая теория поля, но обычно, говоря о ней, подразумевают локальную теорию (см. примеч. 80), в которой определен квантованный оператор  $\psi = \psi(x, y, z, t)$  и все физические величины в каждой пространственно-временной точке выражены через  $\psi$ .

Величина  $\psi$  представляется через операторы рождения и уничтожения каких-либо элементарных частиц. Между  $\psi$  и соответствующей ей сопряженной величиной определяют перестановочные соотношения. Все это локальные понятия.

Я уже говорил, что мы пользуемся пространством Минковского. Зададим поле в некоторой точке и рассмотрим множество точек, смещенных относительно первой в пространственном направлении (пространственно-подобных ей — см. примеч. 81). Эти точки, образно говоря, находятся относительно первой точки «в настоящем времени» (в смысле частной теории относительности), или ей «одновременны». Физические величины в двух пространственно-подобных точках коммутируют. Это значит, что их можно выбирать независимо друг от друга.

Для времениподобных точек последнее, вообще говоря, не имеет места. Разумнее считать, что времениподобные точки причинно связаны друг с другом. В квантовой теории поля наличие причинной связи (то обстоятельство, что одну величину нельзя выбрать независимо от другой) появляется в отсутствии коммутативности. Такая форма причинности согласуется

с ограничениями, вытекающими из частной теории относительности, о которых мы говорили на прошлой лекции.

Все это не выходит за рамки современной теории относительности и квантовой теории. Где же находится то, чего мы не знаем? Есть мнение (разделяемое не всеми), согласно которому все неизвестное, нам новое заключено в предельно микроскопических, крайне малых объемах. Такая точка зрения напоминает мнение о без-

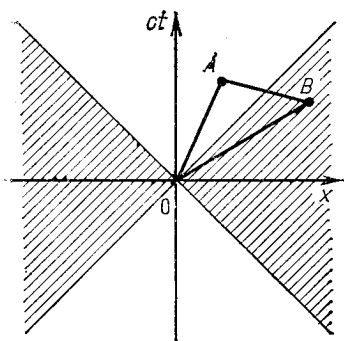


Рис. 9. Причинность в частной теории относительности

граничной делимости вещества и пространства (о котором я говорил на первой лекции), выраженное в современной, несколько обновленной форме, и официально она сегодня представлена понятием локального поля (*смех в зале*). Взаимодействие тоже локальное. Мы видим здесь типичный пример теории близкодействия. Среди локальных теорий наибольшего успеха добилась квантовая электродинамика. Теория мезонов тоже в ка-

кой-то мере удачна, но в ней остались еще некоторые неясности. Во всяком случае и она — локальная теория.

В 1950 г. или несколько раньше я пытался рассмотреть нелокальное поле. Для введения нелокальности точку нужно заменить протяженной областью. Как описать эту область? Для простоты я сначала рассмотрел кружок в пространстве-времени. Функции точки в нелокальной теории переходят в функции множества точек, а области можно выбирать по-разному.

При нелокальном подходе сразу возникает затруднение с причинностью. Релятивистское понятие причинности пояснено на рис. 9. Начало отсчета 0 может влиять на точки незаштрихованной области, а точки, расположенные в заштрихованных участках, нельзя связать причинно-следственной связью с точкой 0. В частности, начало отсчета 0 может оказать влияние на точку A. Включим в рассмотрение еще одну точку, напри-

мер точку  $B$ , взаимно независимую с точкой  $O$ . Тройку точек  $A$ ,  $B$  и  $O$  рассматривать вместе неудобно из-за того, что они неравноправны: точка  $O$  может повлиять на точку  $A$  и не может воздействовать на точку  $B$ . Если пространственно-временная область (заменяющая точку при нелокальном подходе) — треугольник, то выбирать в качестве этой области фигуру  $AOB$  неудобно, и этот выбор плох в любой системе отсчета, так как свойство пар точек быть времени- или пространственно-подобными инвариантно относительно преобразования Лоренца. Если твердо придерживаться релятивистской причинности, то возникает много неприятностей.

### О конечных разностях

Я чувствовал себя тогда так, будто вернулся к тем далеким временам, когда еще не различали причину и следствие. У меня выходило, что релятивистское рассмотрение протяженных областей невозможно, если не условиться, что все точки внутри них в каком-то смысле одновременны: ведь одновременными мы считаем те объекты, которые рассматриваем совместно. Чтобы избежать неприятностей, мне нужно было научиться трактовать как одновременные пары точек в моих протяженных областях, разделенные ультрамикроскопическими времениподобными промежутками. Речь шла о том, чтобы наделить времениподобные интервалы свойствами пространственно-подобных. Понятия времениподобного и пространственно-подобного интервала всегда были взаимоисключающими, но как быть, если не относиться к этим крайне малым времениподобным промежуткам как пространственно-подобным? Пространственно-временная область в теории относительности не может быть чисто пространственно-подобной. Она автоматически включает времениподобные интервалы. Но если мы думаем об этой области как о едином целом, то мыслим ее одновременно существующей. Спрашивается, можно ли такую идею выразить не только словесно, но и математически? Оказывается, это возможно.

Подобными проблемами много занимался советский физик М. А. Марков. Просто удивительно, насколько похожими оказались его и мой подходы. Разумеется, в деталях были различия, но между нашими подходами можно проследить глубокую связь. М. А. Марков стал заниматься этими вопросами раньше, а в Японии над

ними работал проф. Коно (Университет в Иокогама). Идеи этих исследователей немного различаются, но я попробую, пренебрегая различиями, изложить их следующим образом.

Построим некое локальное поле, сильно отличающееся от обычных локальных полей, так сказать, недоброкачественное поле. Пусть расстояние между началом отсчета 0 и точкой  $A$  (рис. 10) равно  $a$ . Потребуем,

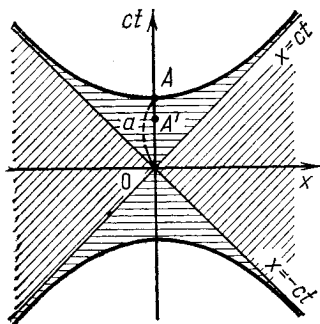


Рис. 10

чтобы поле в точке  $A'$  коммутировало с полем в точке 0. Это значит, что пространственно-подобная область занимает не только часть, заштрихованную на рис. 10 косыми линиями, но и горизонтально заштрихованный участок, т. е. проникает внутрь светового конуса (см. примеч. 82), ибо полевые величины в некоторых точках светового конуса теперь коммутируют (либо антикоммутируют): ведь мы потребовали, чтобы коммутатор (или антиком-

мутатор, см. примеч. 83) равнялся нулю. М. А. Марков говорил немного другое, но, в общем, введем такое поле.

Что у нас получилось? Теперь в некоторых парах времениподобных точек поля взаимно независимы. Полевые величины в точках области, заштрихованной на рис. 11, независимы от поля в точке 0. Независимы также поля в точках  $P$  и  $S$ , но этого нельзя сказать о полях в точках  $R$  и  $S$ . А в точках  $R$  и  $S'$  поля тоже независимы. Где находится геометрическое место точек, поля в которых взаимно независимы? Ответ простой: поскольку граница области, значения поля в которой не зависят от поля в точке 0, дается гиперболой, нужно, отправляясь от точки 0, построить семейство гипербол, огибающие которого ограничат времениподобную полосу ширины  $a$  (рис. 12).

С обычной точки зрения поля в этой области не независимы. В ортодоксальной квантовой теории поля рассматривают гиперплоскость (ее толщина  $a$  равна нулю, см. примеч. 84), на которой в момент  $t_0$  задают

начальные условия, а ситуацию в последующие моменты определяют из уравнения Шрёдингера или уравнения Томонага—Швингера (см. примеч. 85).

Но сейчас я говорю совсем о другом. По Маркову и Коно, в полосе  $I$  (заштрихованная на рис. 13 полоса, заключенная между прямыми  $L_1$  и  $L_2$ ) полевые величины коммутируют друг с другом и их можно выбирать взаимно независимо. Принимая их за начальные усло-

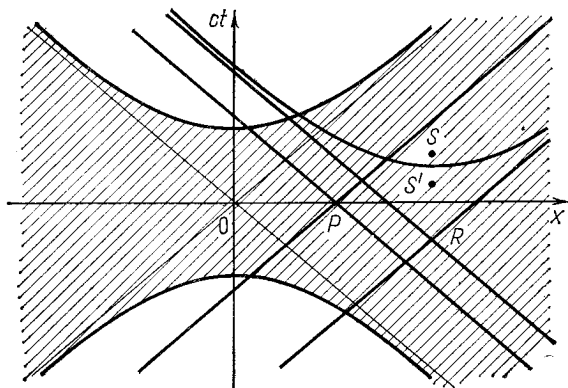


Рис. 11

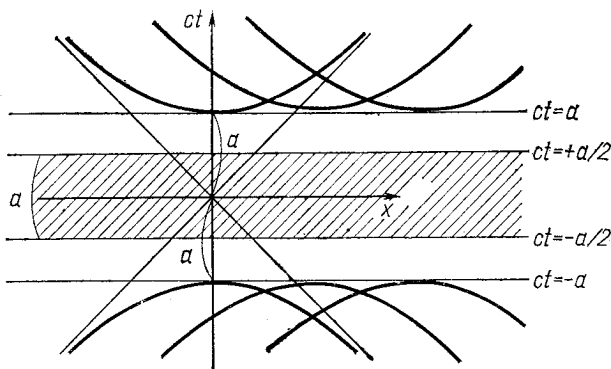


Рис. 12:

если, отправляясь из точки  $O$  и двигаясь вдоль оси  $x$ , строить пары гипербол, то огибающие полученного семейства гипербол представятся парой прямых  $ct = \pm a$ . Сместим теперь исходную точку вниз с линии  $ct=0$ . Если ее сместить в положение  $ct=-a$ ,  $x=0$ , то огибающая семейства гипербол займет положение  $ct=a/2$ . Наоборот, смещая исходную точку вверх, в положение  $ct=a/2$ ,  $x=0$ , получим, что нижняя огибающая семейства гипербол сместится в положение  $ct=-a/2$

вия, можно, по-видимому, определить значения поля в полосе  $II$  (на рис. 13 она заключена между прямыми  $L_2$  и  $L_3$ ). Связь между значениями поля в областях  $I$  и  $II$  напоминает уравнение Шрёдингера. Говорят, что такая программа осуществима. Я не изучал как следует этот вопрос и не знаю, нет ли здесь противоречий с теорией относительности. Пока, по-моему, противоречий не обнаружено.

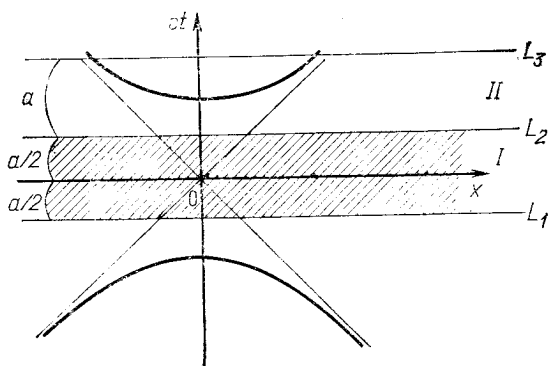


Рис. 13

Возникающее уравнение является уравнением в конечных разностях (см. примеч. 86) по временной переменной. Мой подход немного отличался — я рассматривал элементарные домены. Из-за нехватки времени не буду объяснять, что они собой представляют. При этом тоже оказывается, что физический закон, напоминающий уравнение Шрёдингера, записывается в виде уравнения в конечных разностях. Подробнее об этом можно прочитать в статье, опубликованной несколько лет назад в журнале *Progr. Theor. Phys., Supplement* (см. примеч. 87). Ясных выводов в ней не сделано, но вопрос этот затронут. Обычно считают, что в отличие от общей теории относительности частная теория относительности применима на сколь угодно малых расстояниях. Здесь же получается, что при рассмотрении крайне малых областей появляется дискретность, увеличивающая число степеней свободы; именно, возникает еще одна степень свободы во времениподобном направлении.

Хорошо известный вам работающий здесь, в Японском государственном университете, доктор Нака рассмотрел времениподобную «струну» (см. примеч. 88).

Его работа имеет прямое отношение к обсуждаемым вопросам. Итак, пусть нечто, напоминающее струну, натянуто во времениподобном направлении. Кое-какие ограничения на движение этой струны, конечно, имеются, но в общем она может двигаться довольно свободно. Разобьем ее мысленно на куски (рис. 14). Колебания куска  $A_2$  определяются колебаниями куска  $A_1$ . Оказывается, что уравнение движения этой струны —

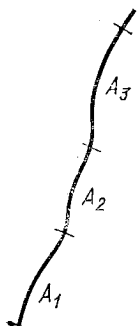


Рис. 14

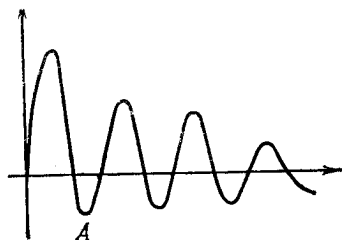


Рис. 15

тоже уравнение в конечных разностях. Доктор Нака исследовал этот вопрос, удачно воспользовавшись понятием дуальности (см. примеч. 89). Здесь происходит квантование, напоминающее квантование классических частиц. Если произвести еще вторичное квантование, то возникнет ситуация, о которой мы говорили.

Напомню, что мы интересовались вопросом, нельзя ли сделать так, чтобы величина, похожая на локальное поле, была коммутативна не только вне, но и кое-где внутри светового конуса. Оказалось, что ответ на этот вопрос приводит к удивительным результатам. Например, рассматривая наше поле как совокупность полей с разными массами, мы приходим к распределению масс в форме волны, показанной на рис. 15, плюсы и минусы которой имеют смысл знаков метрики гильбертова пространства (см. примеч. 90): метрика отрицательна там, где отрицательна масса. К сожалению, получается, что масса изменяется непрерывно. Физический смысл этих результатов пока не выяснен.



В случае струны вторичное квантование дает другие результаты. Если рассмотреть возбуждение нормальных колебаний струны с учетом метрики гильбертова пространства, то окажется, что при переходе от одной нормальной моды к другой метрика попеременно меняет знак, так что при учете всевозможных нормальных колебаний, по-видимому, удастся доказать сходимость теории (см. примеч. 91). Эта необычная ситуация пока еще не понята.

Получается, что затронутая нами тема тесно связана с проблемой индефинитной метрики (см. примеч. 92). Индефинитность означает, что метрика гильбертова пространства может быть как положительной, так и отрицательной; последнее затрудняет вероятностную интерпретацию (см. примеч. 93). Таким образом, возможно, что в ультрамикроскопических областях не имеет места унитарность.

В теории поля основную роль играет  $S$ -матрица. (Может оказаться, что кроме  $S$ -матрицы в будущую теорию необходимо ввести и другие столь же фундаментальные понятия. В частности, это может потребоваться в теории с нелокальностью.) В последнее время Окубо (США, Рочестерский университет) в связи с теорией  $S$ -матрицы предложил четырехмерное квантование, чем я тоже давно интересовался. В этом направлении работают проф. Катаяма и проф. Токуока (Токийский университет), а первые работы принадлежат Кестеру (ФРГ), результаты которого, к сожалению, не выходят за рамки теории  $S$ -матрицы обычного локального поля. Вообще говоря, неясно, зачем все это делается. Мне кажется, здесь нет четкого понимания цели. Но надо надеяться, что какая-то польза от этих работ будет.

Предпринимались попытки обобщить подход Кестера, в частности, этим занимался Такахаси (Канада). Деятельность этого рода в разных работах называют по-разному, и неясно, насколько различия в названиях отражают разницу содержания. Например, Окубо полагает, что он занят суперквантованием, Кестер говорит о гиперквантовании, а Намбу (США, Чикагский университет) — о третьем квантовании. Конечно, пока предмет исследований не установился, различия в названиях неизбежны. Окубо характеризует ситуацию словами:

«в этом пространстве есть как упорядоченные, так и неупорядоченные точки».

Рассматриваемый ими класс пространств содержит в себе пространство Минковского (но не исчерпывается им). Пары точек в таких пространствах могут быть как упорядочены, так и неупорядочены. В обычном ньютоновом мире все пары точек, относящихся к разным моментам времени, упорядочены во времени для любых

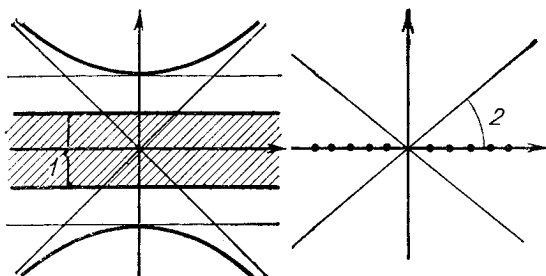


Рис. 16:

1 — толщина области настоящего; 2 — настоящее (толщина области равна нулю). Семейство точек, одновременных данной, в обычном пространстве Минковского представляется плоскостью, не имеющей толщины (правый рисунок). В нашем случае это множество точек представляется четырехмерной заштрихованной областью конечной толщины

временных интервалов. В пространстве Минковского пары времениподобных точек упорядочены, а для пространственно-подобных точек временное упорядочение не имеет места. Окубо занят проблемой определения  $S$ -матрицы в пространствах с такими свойствами упорядочения.

Не вдаваясь в подробности, отмечу лишь, что по свойствам упорядочения указанные пространства существенно отличаются от пространства Минковского. При переходе от них к пространству Минковского возникают дополнительные ограничения на пары одновременных взаимно неупорядоченных точек.

Здесь вводится, правда не в том, в каком я говорил, смысле, область конечной ширины, в которой точки одновременны друг другу, т. е. находятся друг относительно друга «в настоящем времени» (см. рис. 16). Как определить причинность в областях этого «настоящего», имеющего конечную ширину одновременности? Не нужно ли здесь поменять местами понятия времениподобного и пространственно-подобного?

## **О непрерывности и скачкообразности при познании внешнего мира**

В заключение мне хочется еще раз обратить ваше внимание на удивительность того мира, о котором мы говорили. Он по-настоящему загадочен; правда, если хорошенько подумать, в этом отношении ему не уступает и наш повседневный мир, в котором мы с вами живем.

Внешний мир мы познаем главным образом через зрение. Другие чувства далеко уступают зрению в точности восприятия, поэтому знание настоящего мы, в конечном счете, получаем, пользуясь зрением. Вы, как и я, в каждый момент времени воспринимаете современный вам мир, настоящее, строя его с помощью ощущений, в основном зрения.

Но что такое настоящее? Психологи, наблюдая за взглядом человека, осматривающего предмет, анализировали движение глаз. Оказалось, что зрительный образ настоящего формируется в течение не то  $1/50$ , не то  $1/30$  с (точное значение я забыл), когда луч зрения движется. Следовательно, существует интервал времени, в течение которого «схватывается» изображение и формируется зрительный образ. Разумеется, процесс такого схватывания многократно повторяется.

Указанный результат подтверждается феноменом кино. Мы с увлечением смотрим интересный фильм и не замечаем, что кадры выскакивают один за другим. В старых фильмах с низкой частотой следования кадров время экспозиции было больше времени формирования изображения в мозгу человека, поэтому, например, во многих чаплинских фильмах кадры «прыгают». Конечно, старые фильмы имеют свою прелесть, но техническое совершенство современного кинематографа объясняется, в частности, учетом того, что изображение внешнего мира формируется у нас за время около  $1/50$  или  $1/30$  с. Регулировкой частоты кадров удалось ликвидировать ощущение разрывности, скачкообразности фильма, именно в этом причина плавности движений всех тел в современной кинокартине. Это общеизвестно. И наоборот, если тело движется чересчур быстро, то оно становится невидимым для человека. Когда что-то проскакивает в один миг, вообще не остается зрительного образа. В частности, наши чувства слишком грубы, чтобы замечать события в мире элементарных частиц.

Мы спокойно проводим время, не видя, как много разных быстрых событий происходит вокруг. Я вновь отвлекся, но это — оправданное отклонение.

Иногда слепым от рождения возвращают зрение операцией. Внезапно получив способность видеть, они не могут в начальный период ясно ответить, что именно они видят. Следовательно, способность узнавать образы возникает не сразу после возвращения зрения, а развивается постепенно. Чтобы изучить этот процесс, психологи предлагали им рассматривать простейшие фигуры, например треугольник, и следили за движением луча зрения. Он многократно обегал границу треугольника. С течением времени движения замедлялись, луч зрения обходил периметр треугольника плавно и за очень короткое время. Треугольник становился узнаваемым.

А как обстоит дело у нас, обычных взрослых людей? Аналогичные опыты показали, что наш луч зрения не совершает последовательных обходов треугольника. Проследить за его движением в деталях не удастся, но в общем для узнавания треугольника нам достаточно «попрыгать» глазами с вершины на вершину (*смех в зале*). Мы, мудро пользуясь опытом, сразу ухватываем самую суть, даже не пытаясь последовательно обходить границы. После некоторой тренировки и люди с возвращенным зрением, о которых я говорил, начинают действовать таким же образом.

Это очень интересно. Дело здесь в том, что на сетчатке глаза имеется очень чувствительное место (центральное пятно), и глаз движется, когда мы «смотрим этим местом». Но сетчатка довольно велика, и ее участки, удаленные от центрального пятна, тоже могут участвовать в создании зрительного образа. Это очень важно. Именно благодаря «периферическому зрению» мы вскрикиваем, когда сбоку к нам неожиданно приближается подозрительный субъект (*смех в зале*), а при узнавании треугольника способны сразу схватывать целое без последовательного обхода фигуры. Хотя сказанное и не позволяет четко различить понятия непрерывного и разрывного, но, по-моему, имеет довольно тесную связь с этой проблемой.

У человека голова гораздо совершеннее, чем у других живых существ. Конечно, ее достоинства не исчерпываются организацией зрения, но все же зрительные

центры — наиболее высокоразвитый орган обработки информации, и несомненно, что их работа играет исключительно важную роль при функционировании мозга. Способность человеческого глаза смутно видеть в окрестности луча зрения очень важна. Наличие в центре сетчатки крайне чувствительного пятна и способность к периферическому зрению — обе эти особенности человеческого глаза имеют важное значение.

Возможны самые разные стили и уровни духовной и познавательной активности, образа жизни, занятий наукой. Но истинно мудрым можно назвать лишь человека, органически совмещающего способность к предельной концентрации внимания с широтой всестороннего охвата действительности. Того, кто владеет лишь одним из этих качеств, подлинно мудрым не назовешь. Чересчур сосредоточенный и точный человек, не замечающий «отлогого склона подошвы горы», мало чем отличается от того, кто смутно видит все, но не способен сосредоточиться ни на чем конкретно. Я убежден, что вы правильно меня поймете. Этим замечанием решите мне закончить лекции.

## ВОПРОСЫ И ОТВЕТЫ

**Председательствующий:** Есть ли вопросы? Пожалуйста.

**А:** Я хотел спросить о шрёдингеровском коте. Результат предшествующего наблюдения...

**Юкава:** Да, да.

**А:** Так вот, вы сказали, его нельзя определить из уравнения Шрёдингера...

**Юкава:** Да, конечно, из уравнения Шрёдингера определить нельзя.

**А:** Разве это самоочевидно?

**Юкава:** Конечно. Дело вот в чем. Еще до решения уравнения Шрёдингера надо задать начальное состояние. Пусть, например, имеется один электрон, и его волновая функция в некоторый момент сосредоточена в какой-то точке. Как она будет меняться с течением времени? Из решения волнового уравнения видно, что волновая функция неограниченно расплывается. Но если произвести наблюдение, она резко сожмется. Такой результат, к сожалению, нельзя получить как непрерывное решение уравнения. Но предположим, имеется еще

что-то, какое-то другое тело, с которым наш электрон взаимодействует. Учтем и этот случай. Предположим, с электроном связана какая-то установка. Может быть, при ее учете фактор разрывности исчезнет? Оказывается, нет. Наиболее ясно это можно проследить как раз на примере с котом.

Включим в систему, связанную с котом, все, от радиоактивного элемента до ампулы с синильной кислотой. Взаимодействия в этой системе происходят независимо от того, посмотрели мы на кота или нет. Что с ним стало, мы можем узнать, приоткрыв крышку. Можно, конечно, и не открывать крышку, если считать, что все заключено в стеклянный сосуд. В какой-то момент кот погибает. Его гибель указывает на внезапное сжатие волнового пакета. Язык, конечно, тяжеловат, но суть в том, что произошло нечто, соответствующее сжатию волнового пакета. Тут уж ничего не поделаешь. Как бы мы ни увеличивали размер объекта, все равно в явлении сжатия волнового пакета нас будет преследовать индетерминизм. Индетерминизм этот объективен. Его лучше выразить, считая, что волновой пакет внезапно сжимается.

Несогласные с этим считают, что надо рассматривать сколь угодно большие системы, последовательно включая все новые и новые взаимодействия. Но сжатие пакета произойдет даже если включить все. Кстати, когда говорят о включении всего, надо включать также и думающего субъекта.

**А:** Профессор считает, что кота тоже можно описать волновым уравнением?

**Юкава:** Такие сложные системы описываются не волновым уравнением, а подходящей статистической смесью. Но какую бы статистическую смесь ни взять, устранить индетерминизм невозможно. Правда, если кто-либо предложит другую, более удачную версию несомненной гибели кота в определенный момент времени, тогда другое дело (*смех в зале*).

Однако для другой версии нет оснований. В конце концов дело сводится к микропроцессу, а в нем индетерминизм остается. Радиоактивный распад — сложное явление, наиболее простые его варианты описываются мезонной теорией. Проживет ли радиоактивный атом без распада 10 дней или распадется за 10 мин — вопрос вероятности, и у нас нет другой, не статистиче-

ской теории. Думаю, и в будущем такая теория не сможет появиться.

**А:** Никак не пойму. Например, в нашем случае кот заперт в ящике. До того, как мы открыли ящик и посмотрели, должен кот описываться суперпозицией волновых функций или нет?

**Юкава:** Смотреть или не смотреть — это все равно. В данном случае безразлично, смотрите ли вы на кота, или на звезды. Но когда вы смотрите на небо, вы можете предсказать солнечное и лунное затмение, а смотря на кота, ничего предсказать не можете. Различие между этими случаями обусловлено законами микромира. Именно к этому сводится разговор о жизни или смерти кота. Если вам не нравится кот, можно заменить его чем-то еще (*смех в зале*), ограничиться счетчиком или поставить вместо кота какой-либо измерительный прибор, правда, тогда будет не столь впечатляюще.

**А:** Тогда кота лучше заменить человеком. А так как человека убивать не будем, можно приделать лампочку...

**Юкава:** И так далее, это хорошо.

**А:** Итак, в ящике сидит человек, глядя на лампочку, он знает, горит она или нет. Но можно ли описать состояние людей вне ящика суперпозицией амплитуд ожидания того, что человек в ящике видит свет или не видит его?

**Юкава:** Теперь другое дело. Но так как в ящике есть окно, снаружи люди видят все одновременно с тем, кто внутри. Хорошо, конечно, вместо кота поставить лампочку, но смотрит один, два или сколько угодно людей, безразлично. Произошел элементарный природный процесс. Повторяю, это микроявление.

**А:** В конце концов, эта точка зрения.

**Юкава:** Не в точке зрения суть. Этот вопрос не решается изменением точки зрения, как решаются многие парадоксы, связанные с путаницей и ошибочными мнениями о микромире, возникающими из-за его отличия от привычного, повседневного мира. На таком пути в нашем случае ничего не сделаешь. Впрочем, если угодно, можно рассмотреть дело по-другому, но в конце концов мы придем к тем же заключениям.

Можно, например, иначе рассказать о дискуссии Бора с Эйнштейном, о которой мы сегодня говорили, но ведь результат спора от этого не должен измениться.

Что это была бы за истина, содержание которой изменялось бы в зависимости от точки зрения? (*смех в зале.*) В этом суть проблемы. Возможно, конечно, что найдут другое истолкование действительности. Например, Бом предлагал теорию со скрытыми параметрами. При определенной комбинации этих параметров кот умрет в течение часа, а если за это время он не погиб, значит, где-то есть нечто, предопределившее другой ход событий. Конечно, хорошо бы разработать подобную теорию, но как сделать практически, чтобы она была удачной и хорошо работала?

**А:** Так что же, получается что волновую функцию нельзя применять к макроскопическим системам?

**Юкава:** Когда мы говорим о волновой функции кота, нам безразличны детали его полного состояния. Ведь мы интересуемся только тем, жив он или нет, только этой степенью свободы.

**А:** Да, конечно.

**Юкава:** Других степеней свободы очень много, но они не относятся к обсуждаемому вопросу. В какую сторону повернулся кот перед кончиной, нас не интересует (*смех в зале*). Нужно рассматривать только те степени свободы, которые имеют отношение к делу, в нашем случае связанные с распадом радиоактивного атома и вопросом о жизни и смерти кота (или о том, зажглась ли лампочка). Масса событий, которые могут произойти в промежутке между этими двумя, и остальные степени свободы кота к делу не относятся. Поэтому несущественно, металлический ли ящик, или стеклянный, или он сделан из чего-нибудь еще.

Иордан сказал бы, что в случае с котом работает механизм гигантского усиления, но это уже предмет специального рассмотрения. В общем, при измерении микроскопических величин мы должны как-то связать микроявления с макрообъектами. Это одна из разновидностей гигантского усиления.

Точку зрения, конечно, менять хорошо, но в обычной квантовой механике на таком пути не получишь особых результатов. Вот на несколько более продвинутой стадии, в теории элементарных частиц, где никто не знает истину, предлагать любые, самые необычные точки зрения похвально. Менять же точку зрения на уровне квантовой механики — занятие бесплодное, хотя,



конечно, пытаться думать всегда полезно, ведь это — тренировка для ума (*смех в зале*).

**Председательствующий:** Есть ли у кого-нибудь еще вопросы?

**В:** О частной теории относительности Эйнштейна мы слышали в школе, а ее формулы нам объясняли на лекциях по общей физике. Исторически эта наука возникла из опыта Майкельсона — Морли?

**Юкава:** Это очень сложный вопрос. Выяснить историческую истину, против ожидания, довольно трудно. Достаточно сказать, что сам Эйнштейн не знал опыта Майкельсона—Морли.

**В:** Так что же, Эйнштейн исходил только из стремления согласовать законы природы?

**Юкава:** Да, и как он сам говорил, скорее из стремления установить инвариантность законов природы относительно преобразования Лоренца, которое тогда было известно — Лоренц его уже вывел. Это, видимо, было главным стимулом. Правда, кроме опыта Майкельсона—Морли были и другие опыты, о которых мы с вами хотя и слышали, но недостаточно хорошо их знаем. Эйнштейну они были известны, а вот превосходного опыта Майкельсона—Морли он, по-видимому, не знал. В своей первой статье он его не упоминает, и позже говорил, что не знал этого опыта. Все это очень странно.

**А:** У меня еще один простой вопрос. Верно ли я понял, что, по вашему мнению, у физики когда-нибудь наступит конец?

**Юкава:** Верно.

**А:** Как же это может произойти?

**Юкава:** Вещи, не имеющие конца, представляются мне очень странными (*смех в зале*). Все, что делают люди, обязательно имеет конец (*смех*), бесконечность здесь отсутствует. Думать о бесконечности неестественно, понятие это введено математиками, а в человеческих делах бесконечности нет. Да и с элементарными частями когда-нибудь полностью разберутся, только не взорвали бы раньше этого Землю (*смех*). Будем надеяться, что такого не произойдет. Но еще раньше может случиться, что людям просто надоеет трудиться, а заниматься наукой станет противно (*взрыв смеха*). В са-

мом деле, наступит всеобщая апатия. Ну, а если не надоест, то развитие будет неограниченным.

**Председательствующий:** На этом заканчиваем лекции.

*(Продолжительные аплодисменты.)*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эта книга содержит полный конспект лекций, прочитанных проф. Юкава 18—20 марта 1974 г. Лекции назывались «Основные проблемы физики» и были организованы Японским государственным университетом. Вход был свободным, и лекции прослушало несколько сот студентов из многих научно-технических вузов Токио.

Воспользовавшись случаем, скажу немного о том, почему я занимался этой книгой. Когда я только что окончил университет и приступил к самостоятельным исследованиям, мне очень понравилась предложенная проф. Юкава тема по нелокальной квантовой теории поля. Впоследствии я, так же, как и проф. Юкава, занимался разработкой вопроса о едином описании элементарных частиц на основе представления о пространственно-временной размазке. В ходе этой работы я по нескольку раз в год участвовал в созываемых профессором семинарах на эту тему и имел счастье слушать его глубокие, пронизательные суждения о сути проблемы. Учитывая мой близкий контакт с проф. Юкава, издательство «Коданся» обратилось ко мне с любезным предложением издать записи его лекций.

Перед внимательной и благодарной аудиторией — студентами токийских вузов — Юкава обрисовал возвышенный образ физики, созданный им для себя самого. Конечно, сами по себе проблемы, о которых говорил Юкава, часто не новы, и о них можно прочесть в других печатных изданиях. Но чрезвычайная отзывчивость аудитории, а также различные отступления, оживляющие лекцию и воспроизведенные с возможной полнотой в данной книге, придают ей неповторимое очарование. Особенно я хотел бы подчеркнуть, что в этой книге физика не предстает как «законченная наука», а раскрывается в процессе ее становления. Мы видим яркие образы творцов физики. Физика описана как активная деятельность обуреваемых чувствами людей, выявляет-

ся естественная и глубокая связь физики с ее создателями. Такое живое изображение может дать только человек, творчески участвовавший в создании физики. Юкава — как раз такой человек, что в полной мере проявилось в данной книге. Книга эта — не учебник, она — явление в истории науки; думаю, что ее оценят все люди, любящие не только физику, но и науку вообще.

Яркое весеннее солнце освещает просторный лекционный зал, в котором собралась молодежь — студенты столичных вузов. Перед ними в непринужденной манере профессор читает лекцию. Это не «лекция» в общепринятом смысле слова, а, скорее, беседа, которую учитель ведет с учениками на равных, в дружеской атмосфере. Следить за речью учителя и воспринимать ее помогает его приятный токийский диалект, необычайно оживляющий повествование. Специфический ненавязчивый юмор и своеобразный язык Юкавы не потеряли своей прелести даже в рукописи. За три дня учитель охватил всю физику, мы ощутили ее как целое и познакомились с образами некоторых из ее замечательных создателей. Отступления и интересные эпизоды, рассказанные учителем, были целесообразны и оказывали желаемое действие.

В этой книге записана подлинная речь Юкавы, т. е. книга не является рукописным произведением. Естественно, что при попытке представить записанный на магнитную ленту материал лекций в виде книги мы столкнулись с тем, что иногда факты изложены не так, как следовало бы в «рукописном произведении». Думаю, это объясняется тем, что лектор утомился. Чтобы исправить эти недостатки, при подготовке материала к печати пришлось внести авторскую правку, устранить некоторые повторы и неточности. Делать это мы старались так, чтобы не нарушить общего впечатления от лекций. Но поскольку речь Юкавы далека от стиля обычных заранее написанных лекций и в каком-то смысле представляет собой свободную беседу, при подготовке к печати мы по возможности стремились точно воспроизвести то, что он говорил, поэтому правка наша, естественно, была ограниченной.

В связи со сказанным временами может показаться, что материал сыроват. Кроме того, у нас возникли трудности при соотнесении рисунков и формул с текстом.

Все рисунки и формулы, естественно, были скопированы с доски, но осталось неизвестным, в какой именно момент рисовал их Юкава. За эти недостатки мы приносим читателям свои извинения, но надеемся, что смысл сказанного Юкавой мы все же донесли всюду ясно.

Книга рассчитана на читателя, знакомого с физикой в целом. У лиц, не имеющих научно-технической подготовки, терминология и разные недомолвки могут вызывать некоторые затруднения, поэтому в конце книги в виде примечаний дан довольно подробный комментарий. Однако думаю, что при чтении нет необходимости постоянно заглядывать в примечания.

В ходе подготовки книги к печати большую помощь при редактировании текста и составлении примечаний оказали лектор Японского государственного университета Накамура и профессор того же университета Гото. При переложении текста с магнитной ленты на бумагу нам очень помог Ирагаси (Институт теоретической физики при Варшавском университете). Появлению этой книги, от первоначального замысла до оформления печатного текста, много сил отдал сотрудник издательства «Коданся сайнтифику» Тасиро. Всем этим лицам я приношу сердечную благодарность.

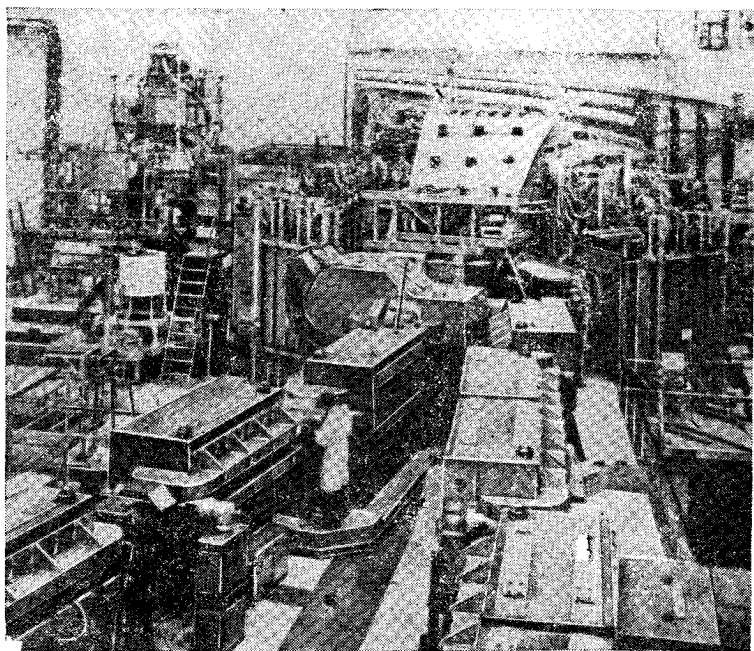
*20 января 1975 г.*

*О. Хара*

## ПРИМЕЧАНИЯ

### ЛЕКЦИЯ 1

**1. Встречные пучки.** В обычных ускорителях частица, разогнанная до высокой энергии, ударяется с покоящуюся мишенью. Если частице массы  $m$  сообщена энергия  $E$ , то в системе центра масс энергия соударения частицы и мишени не превышает  $\sqrt{2mE}$ . Однако если разогнать и частицу и мишень и осуществить их лобовое столкновение, то в системе центра масс можно использовать пол-



ЦЕРНовский протон-протонный ускоритель на встречных пучках  
(Женева, Швейцария)

ностью всю сумму энергий частицы и мишени  $E$  и  $E'$ . Именно поэтому стали строить ускорители на встречных пучках. Например, при лобовом столкновении двух протонов с энергиями по 25 ГэВ энергия в системе центра масс такова же, как при столкновении неподвижного протона с протоном, ускоренным до 1250 ГэВ. Внешний вид ускорителя на встречных пучках показан на фотографии. В действительности не производят лобового столкновения, а пользуются установкой с двумя тороидальными циклотронами, пучки которых перекрещиваются под углом  $15^\circ$ .

Таблица 1

*Характеристики лептонов*

Название	Символ	Электрический заряд	Масса, МэВ	Время жизни
Электрон	$e^-$	-1	$0,5110623 \pm \pm 0,0000014$	$> 2 \cdot 10^{21}$ лет
Позитрон (античастица)	$e^+$	+1	То же	То же
Отрицательный мюон	$\mu^-$	-1	$105,65948 \pm \pm 0,00035$	$(2,1994 \pm 0,0006) \times 10^{-6}$ с
Положительный мюон (античастица)	$\mu^+$	+1	То же	То же
Электронное нейтрино	$\nu_e$	0	$< 0,00006$	Стабильно
Электронное антинейтрино	$\bar{\nu}_e$	0	То же	То же
Мюонное нейтрино	$\nu_\mu$	0	$< 1,2$	Стабильно
Мюонное антинейтрино	$\bar{\nu}_\mu$	0	То же	То же

Примечание. В настоящее время нет единого мнения по поводу того, какой из мюонов ( $\mu^-$ ,  $\mu^+$ ) считать частицей, а какой — античастицей.

**2. Электрон, мюон, нейтрино (лептоны).** Частицы, образующие давно известное семейство, включающее электрон, называют лептонами. К ним относятся  $e^-$  (электрон),  $\mu^-$  ( $\mu$ -мезон, или мюон),  $\nu_e$  (электронное нейтрино),  $\nu_\mu$  (мюонное нейтрино) и соответствующие античастицы. Лептоны имеют малую по сравнению с адронами (семейство нуклонов и мезонов, см. примеч. 3) массу и не участвуют в сильных взаимодействиях. Все лептоны имеют спин  $1/2$  (по поводу понятия *спин* см. примеч. 16) и подчиняются статистике Ферми (см. примеч. 62). Полагают, что в отличие от адронов они имеют простую структуру.

Сведения о лептонах приведены в табл. 1.

3. Странные частицы, резонансы, адроны. Было время, когда считали, что протон ( $p$ ), нейтрон ( $n$ ), из которых построены атомные ядра (протон и нейтрон называют нуклонами), и  $\pi$ -мезоны ( $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ ), носители сильного взаимодействия (ядерных сил) между нуклонами, образуют замкнутую систему. Но изучение реакций при высоких энергиях (в космическом излучении и на ускорителях) показало, что в нуклонах и мезонах скрыты родственные им нестабильные частицы. Одни из них получили название странных частиц; их времена жизни около  $10^{-10}$  с, и все они распадаются в результате слабого взаимодействия. О других из этих частиц говорят, как о резонансах. Времена жизни резонансов порядка  $10^{-24}$  с, и распадаются они из-за сильного взаимодействия.

Т а б л и ц а 2а

*Гипероны (ферми-частицы, или фермионы)*

Название	Сим-вол	$S$	$Y$	$I$	$I_3$	$Q$	Масса, МэВ	Время жизни, с
Нуклон	$\begin{Bmatrix} p \\ n \end{Bmatrix}$	0	+1	1/2	$\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} +1 \\ 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 938,2796 \pm 0,0027 \\ 939,5731 \pm 0,0027 \end{matrix}$	$\begin{matrix} > 2 \cdot 10^{30} \text{ лет} \\ 918 \pm 14 \end{matrix}$
Ламбда	$\Lambda$	-1	0	0	0	0	$1115,6 \pm 0,05$	$(2,624 \pm 0,014) \cdot 10^{-10}$
Сигма	$\begin{Bmatrix} \Sigma^+ \\ \Sigma^0 \\ \Sigma^- \end{Bmatrix}$	-1	0	1	$\begin{matrix} +1 \\ 0 \\ -1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} +1 \\ 0 \\ -1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1189,37 \pm 0,06 \\ 1192,48 \pm 0,08 \\ 1197,35 \pm 0,06 \end{matrix}$	$\begin{matrix} (0,800 \pm 0,06) \cdot 10^{-10} \\ < 1,0 \cdot 10^{-14} \\ (1,482 \pm 0,017) \cdot 10^{-10} \end{matrix}$
Кси	$\begin{Bmatrix} \Xi_0 \\ \Xi^- \end{Bmatrix}$	-2	-1	1/2	$\begin{matrix} +1/2 \\ -1/2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 \\ -1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1314,9 \pm 0,6 \\ 1321,29 \pm 0,14 \end{matrix}$	$\begin{matrix} (2,96 \pm 0,12) \cdot 10^{-10} \\ (1,652 \pm 0,023) \cdot 10^{-10} \end{matrix}$
Омега	$\Xi^-$	-3	-2	0	0	-1	$1672,2 \pm 0,4$	$(1,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-10}$
Зет	$Z^+$	+2	+2	0	0	+1	$1700 \div 1800?$	$10^{-15}$

Примечание. Данные этой таблицы можно описать формулой  $Q = I_3 + Y/2$ , в которой  $Q$  принимает значения 0 и  $\pm 1$ . При этом  $Y \leq 2$ ,  $I \leq 1$ . Из этой формулы видно, что если  $Y$  — четное (нечетное) число, то  $I$  — целое (полуцелое).

Странные частицы различают с помощью физической величины, родственной заряду и называемой странностью ( $S$ ). Нуклоны имеют изотопический спин 1/2 (изотопический спин, или изоспин, — величина, похожая на спин). Считают, что протон и нейтрон — состояния нуклона, характеризуемые третьей компонентой изоспина  $I_3$ , равной, соответственно, 1/2 и -1/2. Установлено, что странные частицы тоже имеют изотопический спин. Их можно описать, как состояния, различающиеся значением  $S$ . Семейство нуклонов и открытых до настоящего времени мезонов (частицы этого семейства называют адронами) представлено в табл. 2 а, б.

Таблица 26

## Мезоны (бозе-частицы, или бозоны)

Название	Символ	S	Y	I	$I_3$	Q	Масса, МэВ	Время жизни, с
π-мезон	$\pi^+$ $\pi^0$ $\pi^-$	$\left. \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right\} 0$	0	1	$\begin{array}{c} +1 \\ 0 \\ -1 \end{array}$	$\begin{array}{c} +1 \\ 0 \\ -1 \end{array}$	$\begin{array}{c} 139,57 \\ 134,96 \\ 139,57 \end{array}$	$\begin{array}{c} (2,6030 \pm 0,0023) \cdot 10^{-8} \\ (0,84 \pm 0,10) \cdot 10^{-16} \\ (2,6030 \pm 0,0023) \cdot 10^{-8} \end{array}$
K-мезон	$K^+$ $K^0$ $\bar{K}^0$ $K^-$	$\begin{array}{c} \left. \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right\} +1 \\ \left. \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right\} -1 \end{array}$	$\begin{array}{c} +1 \\ -1 \end{array}$	$\begin{array}{c} 1/2 \\ 1/2 \end{array}$	$\begin{array}{c} +1/2 \\ -1/2 \\ +1/2 \\ -1/2 \end{array}$	$\begin{array}{c} +1 \\ 0 \\ -1 \end{array}$	$\begin{array}{c} 493,71 \\ 497,70 \\ 497,70 \\ 493,71 \end{array}$	$\left. \begin{array}{c} (1,237 \pm 0,0026) \cdot 10^{-8} \\ K_S^0: (0,8947 \pm 0,0033) \cdot 10^{-10} \\ K_L^0: (5,197 \pm 0,040) \cdot 10^{-8} \\ (1,2371 \pm 0,0026) \cdot 10^{-8} \end{array} \right\}$
η-мезон	η	0	0	0	0	0	$548,8 \pm 0,6$	$10^{-21}$
η'-мезон	η'	0	0	0	0	0	958	$10^{-21}$

Примечание. В современном формализме  $\bar{K}^0$  и  $K^+$  не являются независимыми частицами, это просто античастицы для  $K^0$  и  $K^+$ . Тем не менее, их обычно приводят в таблицах. При распадах  $K^0$  и  $\bar{K}^0$  смешиваются и возникают два других состояния  $K_S^0$  и  $K_L^0$ , важнейшие схемы распада которых  $K_S^0 \rightarrow (\pi\pi)^0$ ,  $K_L^0 \rightarrow (\pi\pi\pi)^0$ .



Физический смысл странности и изотопического спина, применяемых для классификации адронов, не очень ясен; говорят, что это — внутренние квантовые числа, и считают, что они могут оказаться полезными при описании структуры элементарных частиц. С помощью величин  $S$ ,  $I$ ,  $I_3$  удается записать правила отбора при сильных и слабых взаимодействиях. Если  $\Delta$  — изменение соответствующей величины при реакции, то

$$\begin{aligned} \text{в сильных взаимодействиях} \quad & \begin{cases} \Delta S = 0; \\ |\Delta I| = 0; \end{cases} \\ \text{в слабых взаимодействиях} \quad & \begin{cases} \Delta S = \pm 1, (0); \\ |\Delta I| = 1/2, (0). \end{cases} \end{aligned}$$

Например,

сильные взаимодействия:  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$ ;

$$S \quad 0 \quad 0 \quad +1 \quad -1$$

$$K^- + p \rightarrow K^+ + K^0 + \Omega^-;$$

$$S \quad -1 \quad 0 \quad +1 \quad +1 \quad -3$$

слабые взаимодействия:  $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ ;

$$S \quad -1 \quad 0 \quad 0$$

$$\Omega \rightarrow \Xi^- + \pi_0 \text{ (или } \Lambda + K^-);$$

$$S \quad -3 \quad -2 \quad 0 \quad -1 \quad -1$$

По правилу Накано — Нишиджимы — Гелл-Мана квантовое число электрического заряда частицы  $Q$  выражается через третью компоненту изоспина  $I_3$  и гиперзаряд  $Y$ :

$$Q = I_3 + Y/2.$$

При этом  $Y = S + B$  ( $B$  — число гиперонов; для мезонов  $B = 0$ , для нуклинов  $B = +1$ , для антинуклионов  $B = -1$ ).

Все странные частицы рождаются в сильных взаимодействиях, а распадаются в результате слабого взаимодействия. Для оценки относительной интенсивности слабого и сильного взаимодействий (отношения их констант связи) можно рассуждать следующим образом. Протяженность частицы массы  $m$  равна ее комптоновской длине волны  $\lambda = \hbar/mc \approx 2 \cdot 10^{-14}$  см, а время, за которое частица проходит это расстояние со скоростью света (характеристическое время нуклона),  $\tau_n \sim \lambda/c \approx 10^{-24}$  с. По порядку величины это — время жизни при распадах за счет сильного взаимодействия. А время жизни при слабом взаимодействии составляет около  $10^{-10}$  с. Следовательно, отношение интенсивностей сильного и слабого взаимодействий равно примерно  $10^{-14}$ .

При столкновениях адронов высокой энергии появляются ультракороткоживущие возбужденные состояния (резонансы). Для выявления резонанса строят зависимость от энергии числа частиц, возникающих в результате столкновения  $\pi$ -мезона с протоном. Оказывается, что при некоторых энергиях  $E_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) на кривой имеются плавные пики. Эти пики связывают с испусканием резонансов — частиц с некоторым временем жизни, массу которых вычисляют по энергии  $E_i$ , соответствующей максимуму. Полуширину

пика, характеризующую неопределенность массы (энергии) резонанса, обозначают  $\Gamma_i$ .

По соотношению неопределенностей Гейзенберга  $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ . Полагая  $\Gamma_i \rightarrow \Delta E$ ,  $\Delta t \rightarrow \tau$ , получают

$$\tau = 0,65 \cdot 10^{-21} / \Gamma,$$

где время выражено в секундах, если  $\Gamma$  измерено в мегаэлектрон-вольтах. Например, при столкновениях  $\pi$ -мезонов с нуклонами сначала появляется пик при  $E_1 = 1240$  МэВ с  $\Gamma_1 \approx 300$  МэВ, что соответствует, согласно записанной формуле, времени жизни  $2,16 \cdot 10^{-24}$  с. Этот пик характеризует вклад резонансов с массой 1240 МэВ. У этих частиц  $I = 3/2$ ,  $S = 0$ ; они имеют спин  $3/2$ .

Оказалось, что спин резонансов увеличивается при увеличении их массы. Этим они сильно отличаются от странных частиц, спин которых такой же, как у нуклонов или  $\pi$ -мезонов, а странность и изоспин во всех известных опытах принимают небольшие значения ( $|S| \leq 3$ ,  $I \leq 3/2$ ). По сравнению со спинами странных частиц спины резонансов могут принимать довольно большие значения.

Пользуясь квантовыми числами, например четностью, резонансы можно подразделить на еще более узкие группы. Замечено, что у частиц, относящихся к одной группе, квадрат массы  $M$  прямо пропорционален их спину  $J$ ,  $M^2 = aJ$  (смысл этого эмпирического соотношения пока не понят).

Резонансы обнаружены также и в группе странных частиц. Следовательно, существование странных частиц и возникновение резонансов обусловлены взаимозависимыми причинами. Полагают, что и те, и другие равно важны для объяснения структуры и взаимодействий адронов.

**4. «Математические начала натурфилософии» Ньютона.** Написаны в 1685—1686 гг., опубликованы в 1687 г. Книга состоит из трех частей. Изложены основы механики, закон всемирного тяготения, приложения к движению жидкости, движению небесных тел солнечной системы и т. п. Первоисточник — на латинском языке.

**5. Материальная точка.** Законы движения реальных тел довольно сложны. Ради простоты рассматривают так называемую материальную точку, т. е. идеальное тело, масса которого сосредоточена в геометрической точке (в бесконечно малом объеме). Координаты материальной точки определяют, как координаты геометрической точки пространства. Ньютон обнаружил, что задача притяжения Луны к Земле решается довольно просто, если небесные тела заменить материальными точками соответствующих масс, помещенными в центрах этих тел. При преобразованиях симметрии и лоренц-преобразованиях материальными точками удобно считать элементарные частицы. Ясно, что представление о материальной точке идеализирует действительность и при формулировке правильных законов нужно учитывать протяженность тел, но все же идею материальной точки нелегко отбросить из-за ее удобства.

**6. Векторы.** Обозначим  $P$  и  $Q$  две точки в пространстве или на плоскости. Об отрезке, соединяющем  $P$  и  $Q$  с учетом его направления говорят, как о векторе, и обозначают его  $\overrightarrow{PQ}$ . Векторными величинами являются, например, сила, скорость, ускорение, импульс, момент количества движения. Раздел математики, изучающий дифференцирование и интегрирование векторов, называют векторным анализом. Векторы в трехмерном евклидовом пространстве находят приложение в механике, гидродинамике, электродинамике.

законы частной теории относительности Эйнштейна можно представить геометрически, пользуясь векторами в четырехмерном псевдо-евклидовом пространстве Минковского (см. примеч. 38). Приставка *псевдо* здесь означает, что если вместо вещественной четвертой координаты использовать координату  $x_4 = ict$  и рассматривать  $x_4$  как вещественное число, то в соответствующем пространстве будут справедливы аксиомы евклидовой геометрии. Общую теорию относительности невозможно изложить на языке евклидовой геометрии, при ее формулировке надо пользоваться неевклидовой геометрией с другими (чем у евклидовой) геометрическими характеристиками пространства.

**7. Аксиоматика.** Гильберт считал, что все теории нужно строить аналогично евклидовой геометрии на основе строгих аксиом. При этом возникает вопрос о связи между различными аксиомами. Современная математика полностью перестроена с помощью аксиоматических методов.

**8. Субматерия.** Этот термин употребляется в смысле возможности дальнейшего подразделения мельчайших элементарных количеств вещества.

**9. Волновая теория света.** Сначала, исходя из прямолинейности распространения света, полагали, что он состоит из частиц. После открытия дифракции, заключающейся в изгибании лучей света, и интерференции возникла волновая теория, уподобляющая свет волнам на воде.

**10. Автобиография Гейзенберга.** Опубликовано в 1969 г.

**11. Мировое уравнение Гейзенберга.** Элементарные частицы — мельчайшие составные части вещества. Согласно современным экспериментальным данным их невозможно разделить на еще более мелкие части. Гейзенберг усмотрел в этом факте основополагающий принцип, согласно которому элементарные частицы — не что иное, как различные состояния единой материи, и надеялся вывести эти состояния из соображений симметрии и таких основных принципов, как лоренц-инвариантность, причинность и т. п. Он искал универсальное уравнение, определяющее состояния материи, и в 1959 г. опубликовал работу, в которой приводилась одна из форм записи его уравнения. Уравнение Гейзенберга согласуется с релятивистской причинностью и удовлетворяет всем мыслимым симметриям и законам сохранения. Но оно недостаточно широко: из него не удастся вывести все богатство элементарных частиц, например, нельзя получить открытые позже многочисленные странные частицы, резонансы, лептоны и т. п.

**12. Копенгагенская интерпретация.** К 1926 г., преимущественно трудами Бора и Гейзенберга, было завершено построение квантовой механики. В качестве фундаментального результата было получено соотношение неопределенностей, смысл которого заключается в том, что значения физических величин, вообще говоря, невозможно предсказать точно. Так как соотношение неопределенностей противоречит принципу причинности доквантовой физики, строго выводимому в ее рамках, в течение многих лет против этого соотношения выдвигали возражения, в ответ на которые в Институте теоретической физики в Копенгагене разрабатывалась, в основном Бором, копенгагенская интерпретация квантовой механики. В конце концов все возражения были сняты, а боровская интерпретация квантовой механики получила повсеместное признание.

Наиболее сильным критиком был Эйнштейн. Он говорил: «Я не могу представить себе, чтобы господь бог любил играть в кости». Эйнштейн считал, что квантовая механика как способ описания природы неполна, так как не позволяет сохранить строгую причинность. Отвечая на это возражение Эйнштейна, Бор сформулировал принцип дополнительности, согласно которому такие взаимоисключающие способы описания природы, как волна и частица, дополняют друг друга.

Гейзенберг отвечал на критику, опираясь на симметрию законов природы и соотношение неопределенностей. Он указывал, что выдвигаемые критиками возражения противоречат фундаментальной симметрии квантовой механики — симметрии между волной и частицей, или соотношению между парами взаимно сопряженных величин (например, импульсом и координатой, энергией и временем). Соотношение неопределенностей не согласуется с классической причинностью. Однако можно определить квантовую причинность, согласно которой есть причинная связь между изменениями во времени амплитуды вероятности во времениподобных областях, а в пространственноподобных областях события взаимно независимы.

Гейзенберг отмечал, что если для определения положения электрона пользоваться, например,  $\gamma$ -излучением, импульсы которого распределены в некотором интервале, то точное указание положения электрона принципиально невозможно из-за испытываемой им отдачи. Бор говорил, что постоянная Планка  $h$  характеризует взаимодействие макроскопической измерительной установки и микроскопического объекта. Но де Бройль отвергал последнее утверждение, указывая, что возможны и микроскопические измерительные установки. Радиоактивный распад происходит стохастически независимо от того, как его измеряют. Измерительная установка, конечно, изменяет меру неопределенности (например, траектория электрона в атоме, имеющем определенную энергию, «полностью» де локализована, а неопределенность как энергии, так и траектории электрона, движущегося в камере Вильсона, «заключена в некоторых пределах»). Тем не менее приходится согласиться с тем, что квантовые явления управляются вероятностными законами.

**13. Степени свободы.** В механике числом степеней свободы некоторой системы называют число независимых величин, необходимых для определения ее положения. Если система состоит из  $N$  частиц, а частицы можно рассматривать как материальные точки, то число степеней свободы такой системы равно  $3N$ . Величины, характеризующие степени свободы, не обязательно имеют смысл координат материальных точек в прямоугольной системе. Можно пользоваться и другими системами координат, удобными для решения задачи.

Понятие степени свободы употребляется не только в классической механике, но и в других областях физики. Под числом степеней свободы при этом подразумевают число независимых параметров, необходимых для определения состояния системы. Например, в квантовой механике одной из новых степеней свободы является спин. В ядерной физике степенями свободы нуклона считают его изотопический спин и странность.

**14. Эйлеровы уравнения движения.** Дифференциальным уравнениям вращения волчка, написанным впервые Эйлером, присвоено его имя. Обозначим  $X, Y, Z$  координаты в неподвижной системе, а  $x, y, z$  — координаты в системе отсчета, жестко связанной с волч-

ком. Если на волчок не действуют внешние силы, то в неподвижной системе отсчета момент количества движения волчка  $\mathbf{N}$  не меняется ( $\mathbf{N} = \text{const}$ ). Но в системе отсчета, закрепленной на волчке, значение  $\mathbf{N}$  непрерывно изменяется согласно уравнению

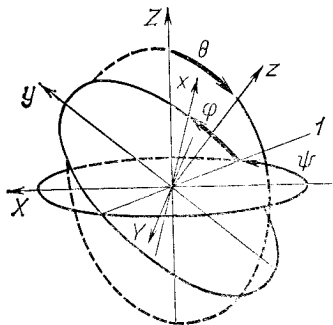
$$d\mathbf{N}/dt = \mathbf{N} \times \boldsymbol{\omega}, \quad (1)$$

называемому уравнением Эйлера. Здесь  $\boldsymbol{\omega}$  — угловая скорость вращения. По компонентам уравнение (1) записывается в виде

$$\left. \begin{aligned} dL/dt &= Mr - Nq; \\ dM/dt &= Np - Lr; \\ dN/dt &= Lq - Mp. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь  $L, M, N$  — составляющие  $\mathbf{N}$ , а  $p, q, r$  — составляющие  $\boldsymbol{\omega}$ .

**15. Эйлеровы углы.** На рисунке показана система угловых координат, используемая для описания вращения твердого тела. В неподвижной системе координат направление «вверх» совпадает с положительным направлением оси  $Z$ , а сама ось  $Z$  определяет вертикаль. В качестве оси  $z$ , закрепленной на волчке, выбирают



Эйлеровы углы ( $I$  — узловая линия)

его ось симметрии. Положительное направление вдоль этой оси отсчитывается от центра масс волчка. Угол между осью  $z$  и вертикалью обозначают  $\theta$ . Узловая линия перпендикулярна к направлениям  $Z$  и  $z$ , а ее положительное направление определяется по правилу правого винта: если вращать правый винт в направлении возрастания  $\theta$ , то ось винта будет перемещаться в положительном направлении узловой линии. Положительное направление оси  $x$  составляет с узловой линией угол  $\varphi$ , а положительное направление оси  $X$  — угол  $\psi$ .

**16. Спин.** Когда Бор, основываясь на своей квантовой теории, занимался объяснением регулярности атомных спектров и периодической системы элементов, он заметил, что для совпадения с опытом число состояний электрона необходимо увеличить вдвое. Ученик Бора Паули истолковал эту идею, как указание на существование новой внутренней степени свободы электрона: у электрона есть два собственных состояния, которые могут переходить друг в друга. Эту новую степень свободы называли спином. Учитывая ее, Паули ввел так называемый принцип запрета (принцип Паули): в системе электронов в одном состоянии не может находиться более одного электрона. С помощью этого принципа Паули успешно объяснил периодическую систему элементов и регулярность атомных спектров. Уленбек и Гаудесмит предложили рассматривать электрон, как протяженное вращающееся заряженное тело. Но им не удалось построить детальную теорию спина. Логичное и математически строгое определение спина как внутренней степени свободы электрона дал Дирак, когда он в 1927 г. открыл свое релятивистское волновое

уравнение. Из уравнения Дирака вытекает правильное значение магнитного момента электрона, не находившее объяснения в модели Уленбека. В теории Дирака спин есть разновидность момента количества движения, а его значение равно  $\hbar/2$ , где  $\hbar = h/2\pi$  ( $h$  — постоянная Планка). При рассмотрении движения электрона надо считать, что его полный момент количества движения  $J\hbar$  равен векторной сумме орбитального  $L\hbar$  и спинного  $S\hbar$  моментов:  $J\hbar = (L + S)\hbar$ . Остается неясным, почему для электрона величина  $S$  равна не целому числу, а  $1/2$ . Грубо говоря, можно считать, что спин связан с собственным вращением электрона; если же говорить строго, то речь идет о собственных значениях внутреннего момента количества движения. Иными словами, спин — величина, связанная с каким-то внутренним вращением электрона.

17. При вращении недеформируемого твердого тела вокруг неподвижной оси его момент количества движения  $L$  связан с моментом инерции  $I$  соотношением  $L = I\omega$  ( $\omega$  — угловая скорость). Здесь  $I = mr^2$ ; следовательно,  $L = mr^2\omega$ . Кроме того,  $r\omega = v$ . Имея в виду эти соотношения, можно заключить, что при  $r \rightarrow 0$  момент количества движения  $L \rightarrow 0$ , но если  $\omega$  возрастает, то  $L$  может остаться конечным.

18. Электрон как точечная частица. При выводе уравнения движения электрона Дирак, сохранив законы частной теории относительности и квантовой механики, считал электрон геометрической точкой... Тем не менее, из теории Дирака следует, что электрон имеет внутреннюю степень свободы, называемую спином (см. примеч. 16), которая, как интуитивно представляется, соответствует моменту количества движения при его собственном вращении. Однако вращение точки, лишенной размеров, очень трудно понять с позиции здравого смысла.

19. Напряжения и деформации упругих тел. Изотропное тело под влиянием внешних сил деформируется, а при снятии внешней нагрузки оно, вообще говоря, тотчас же принимает свою первоначальную форму. Это свойство называют упругостью, а изменение формы под действием внешней силы — деформацией. Когда под влиянием внешней силы тело деформируется, в нем возникают внутренние силы, действующие между различными частями этого тела. Их называют напряжениями. По закону Гука для достаточно слабых внешних сил, не нарушающих упругость, напряжения прямо пропорциональны деформациям. Их отношение называют коэффициентом упругости.

20. Симметричный тензор. Деформации упругого тела с изотропными свойствами можно выразить математически с помощью двух независимых величин, имеющих смысл деформаций вдоль двух осей. Вместе они образуют симметричный тензор. При переходе к другой системе отсчета симметрия тензора не меняется.

21. Евклидово пространство и теорема Пифагора. Евклидова геометрия основана на обычном интуитивном восприятии форм. Аксиоматическое изложение этой геометрии впервые систематизировано Евклидом в его труде «Начала геометрии». Гильберт сформулировал ее, как полную аксиоматическую систему. Выражаясь современным языком, евклидова геометрия изучает инварианты при евклидовых метрических преобразованиях. Аксиома о параллельных и теорема Пифагора имеют место в евклидовом пространстве. Пространства, в которых они не справедливы, называют неевклидовыми (в евклидову систему аксиом входят аксиомы связности, порядка,

конгруэнтности, аксиома о параллельных, аксиомы непрерывности и др.).

**22. Метрическое пространство.** На Земле расстояние между двумя меридианами непостоянно, оно возрастает по мере приближения к экватору и уменьшается при приближении к полюсам. Вообще говоря, расстояния между линиями постоянных координат изменяются (пример, когда эти расстояния неизменны — система прямоугольных координат на плоскости, а противоположный пример — указанная выше система координат на сфере, образованная параллелями и меридианами). В общем случае вводят метрический тензор, имеющий смысл отношения расстояния к разности координат, а пространство, в котором задан метрический тензор, называют метрическим пространством.

**23. Дискуссия Маха с Больцманом.** Мах полагал, что понятие атома — не более, чем математическая модель, вспомогательное средство для объяснения явлений в химии, электромагнетизме, оптике, и мы не можем узнать, существуют ли атомы в действительности. В противоположность этому, преемник Маха на должности профессора кафедры натуральной философии Венского университета Больцман считал, что атомы — реально существующие частицы. Задаваясь значениями массы атома, его объема, числа атомов в 1 г вещества, он вывел термодинамику газов (см. примеч. 32 и 70).

В конце XIX — начале XX вв. во время лекций в Венской Академии наук по вопросу о существовании атомов велись философские дискуссии. Мах владел основами философии. Он развивал субъективистский тезис о непознаваемости мира (так называемый махизм) и критиковал взгляды Больцмана, как вульгарный материализм. В академических спорах Больцман сильно уступал Маху, но всем известно, что в ходе развития науки основанная на атомной теории Больцмана термодинамика восторжествовала, вытеснив другие точки зрения. Величина  $k$ , имеющая смысл газовой постоянной, отнесенной к одной молекуле (эта величина введена Больцманом), названа постоянной Больцмана. Она играет центральную роль в кинетической теории газов.

## ЛЕКЦИЯ 2

**24. Сольевевские конгрессы.** Бельгийский химик и промышленник Сольве, владелец предприятий по производству соды, и его друг Нернст, в то время профессор университета в Бельгии, позже (1920 г.) лауреат Нобелевской премии, задумали начиная с 1911 г. с периодичностью около трех лет созывать конгрессы ведущих физиков. Темы конгрессов менялись, но каждый раз на них рассматривали новые, зарождающиеся области физики. Сольвей и сам имел вкус к занятиям новой физикой. Первый конгресс состоялся в Брюсселе (Бельгия), в отеле «Метрополь», с 30 октября по 3 ноября 1911 г. Участниками его были Резерфорд, М. Кюри, Пуанкаре, Лоренц, Планк, Эйнштейн, Вин, де Бройль. Обсуждались физика атома и существование световых квантов. Годы созыва конгрессов и их тематика приведены ниже. Доктор Юкава получал приглашения и присутствовал на нескольких конгрессах, начиная с седьмого.

1. 1911 г. Теория света и кванты.

2. 1913 г. Строение вещества.

3. 1921 г. Атомы и электроны.
4. 1924 г. Электропроводность металлов.
5. 1927 г. Электроны и фотоны.
6. 1930 г. Магнетизм.
7. 1933 г. Атомное ядро.  
(Перерыв, связанный со второй мировой войной.)
8. 1948 г. Элементарные частицы.
9. 1951 г. Структура твердого тела.
10. 1954 г. Электроны в металлах.
11. 1958 г. Стрoение и эволюция Вселенной.
12. 1961 г. Квантовая теория поля.
13. 1964 г. Стрoение и эволюция Галактики.
14. 1967 г. Фундаментальные проблемы физики элементарных частиц.
15. 1970 г. Природа ядерного синтеза.
16. 1973 г. Астрофизика и гравитация.

**25. Классическая теория излучения и Планк.** При нагревании тела испускают свет. Это тепловое излучение. В конце XIX в. после появления молекулярной кинетической теории газов была создана статистическая механика, и излучение тоже стали исследовать, рассматривая его как ансамбль гипотетических гармонических осцилляторов. Однако выяснилось, что с помощью статистики, основанной на электромагнитной теории света и ньютоновой механике, не удается создать последовательную теорию теплового излучения. Тогда возникла гипотеза Планка о том, что энергия излучения имеет минимальную «порцию», получившую название кванта. Эта революционная мысль стала отправным пунктом квантовой теории. В своем развитии теория теплового излучения прошла несколько стадий.

1. Закон Стефана — Больцмана (1879 г.). Излучение внутри замкнутой полости является равновесным: энергия его распределена по всем колебательным степеням свободы, а плотность энергии  $u$  зависит от абсолютной температуры полости  $T$  по закону  $u = \sigma T^4$ .

2. Закон смещения Вина (1884 г.). Это общий закон распределения полной энергии теплового излучения по частотам колебаний. Если  $u(\nu, T)$  — энергетический спектр излучения, то согласно статистической механике, отношение величин  $\nu/T$  и  $\nu^{-3}u$  есть величина постоянная. Это свойство можно выразить в виде

$$u(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T). \quad (1)$$

То, что  $f$  является функцией  $\nu/T$ , означает, что плотность излучения, зависящая от параметров  $\nu$  и  $T$ , определяется всего одним параметром — отношением  $\nu/T$ .

3. Формула Вина для излучения (1896 г.). Если тепловое излучение считать ансамблем гармонических осцилляторов и применить к нему статистическую механику, то можно вывести следующую формулу для плотности энергии теплового излучения:

$$u(\nu, T) = A \nu^3 \exp [(-\epsilon(\nu)/kT)]. \quad (2)$$

Здесь  $\epsilon(\nu)$  — энергия, приходящаяся на гармонический осциллятор с частотой  $\nu$ ;  $k = 1,38 \cdot 10^{-18}$  эрг/град — постоянная Больцмана. Эта формула основана на распределении Максвелла — Больцмана, описывающем изменение числа молекул газа в заданном объеме при изменении энергии (скорости) молекул; в определенной области частот она согласуется с экспериментальными результатами, пока-

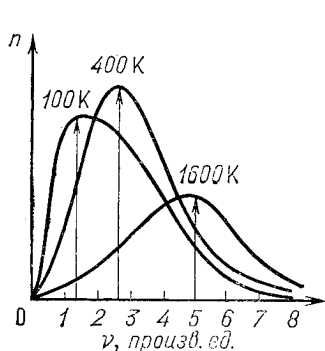


зываются, как меняется интенсивность теплового излучения при изменении частоты света (см. рисунки). Вин не мог объяснить, почему излучение должно вести себя подобно молекулам или осцилляторам, это одна из его гипотез. Но идея Вина очень помогла Планку при формулировке понятия кванта энергии.

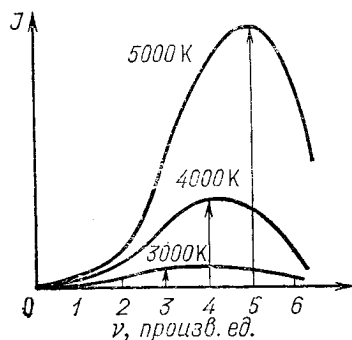
4. Формула Рэлея — Джинса (1900 г.). Пользуясь теорией электромагнетизма, Рэлей и Джинс вывели следующую формулу для спектра энергии теплового излучения:

$$u(\nu, T) = (8\pi kT/c^3) \nu^2 d\nu. \quad (3)$$

Вывод основан на том, что согласно теории электромагнитных волн стоячие волны, находящиеся в равновесии внутри сосуда, могут иметь сколь угодно малую длину волны  $\lambda$ , или сколь угодно вы-



Зависимость числа молекул газа, имеющих заданную скорость, от скорости. По мере роста температуры  $T$  положение максимума числа молекул смещается в сторону больших  $u$ . Средняя скорость возрастает пропорционально  $\sqrt{T}$ .



Зависимость интенсивности излучения от его частоты. При росте температуры положение максимума интенсивности смещается вправо (в сторону больших  $\nu$ ). Частота  $\nu_m$ , при которой интенсивность максимальна, прямо пропорциональна  $T$ .

сокую частоту  $\nu$ . Однако при этом мы сталкиваемся со следующим затруднением: если  $E$  обозначить полную энергию излучения, то, приняв гипотезу о равномерном распределении  $E$  по всем частотам (закон равнораспределения по степеням свободы), приходим к тому, что на каждую частоту приходится бесконечно малая энергия  $E/\infty$ . Формула (3) правильно описывает данные эксперимента только при малых  $\nu/T$ , а формула (2) — лишь при больших  $\nu/T$ .

$$L = m^2 v^2 / r = mrv = m\hbar \nu / mc = \hbar \nu / c,$$

5. Формула Планка для излучения (1900 г.). Планк исходил из следующих предположений: а) порции энергии излучения не могут быть произвольными; б) порции энергии содержат целые

числа мельчайших единиц (световых квантов);  $\nu$  энергия отдельного светового кванта пропорциональна первой степени (не квадрату!) частоты  $\nu$ . Основываясь на статистической механике, он получил, что

$$u(\nu, T) = \epsilon_0 / [\exp(\epsilon_0/kT) - 1]; \quad (4)$$

$$\epsilon_0 = h\nu. \quad (5)$$

Это — формула Планка для излучения. При больших  $\nu/T$  формула Планка переходит в (2), при малых — в (3) и во всей области частот дает результаты, совпадающие с экспериментальными данными. В формуле (5)  $h$  — параметр, названный постоянной Планка;  $h = 6,6 \cdot 10^{-27}$  эрг·с. «Квантовый результат» явно отличается от «классического» при больших  $h\nu/kT$ . Величина  $h\nu/kT$  велика при малых  $T$ , т. е. для низкотемпературных явлений (вблизи абсолютного нуля). В этой температурной области обнаружены такие явления, как низкотемпературное поведение удельной теплоемкости, сверхпроводимость, сверхтекучесть. Кроме того, величина  $h\nu/kT$  велика при высоких частотах (при рассеянии рентгеновского излучения, поглощении и испускании  $\gamma$ -квантов). Квантованность энергии полностью подтверждена экспериментом.

26. В квантовой механике можно принять, что размер электрона равен его компоновской длине волны  $h/mc$ . Тогда для момента количества движения при собственном вращении  $L$  получаем

$$L = m\omega r^2 = mvr = h\nu c.$$

так как  $\omega = v/r$ . Отсюда видно, что максимальное значение  $L$  равно  $h$  при  $v = c$ .

27. Радиус-вектор. Определяет положение тела; имеет длину, равную расстоянию тела от произвольно выбранного начала отсчета, и направлен вдоль прямой, соединяющей тело с началом отсчета.

28. Гамильтон (1805—1865 гг.). Ирландский математик, физик-теоретик и астроном. В 1834 г. придал каноническую форму (см. примеч. 30) уравнениям механики. Впоследствии эта форма записи уравнений механики использовалась при переходе к квантовой механике. Оператор энергии, играющий фундаментальную роль в квантовой механике, назван гамильтонианом в честь Гамильтона.

29. Лагранж (1736—1813 гг.). Французский математик. Применен в механике обобщенные координаты. Записал уравнения механики в форме, удобной для рассмотрения систем с очень большим числом частиц. Лагранжа считают основателем аналитической механики.

30. Канонический формализм. Ньютоновы уравнения движения записывают, пользуясь массой отдельной частицы  $m$ , ее скоростью  $v$  или импульсом  $p = mv$  и силой  $F$ . При очень большом числе частиц получается система уравнений, работать с которой весьма сложно, поэтому, вводя относящиеся к одной степени свободы обобщенную координату  $q_r$ , обобщенный импульс  $p_r$ , переписывая с помощью принципа Даламбера задачу движения, как задачу статики, и применяя вариационный принцип в форме условий равновесия, выводят канонические уравнения Гамильтона

$$\dot{p}_r = -\partial H / \partial q_r; \quad \dot{q}_r = \partial H / \partial p_r,$$

где  $H$  — энергия системы. Теперь уравнения записаны в форме, симметричной относительно канонических переменных  $p$ , и  $q$ .

31. Кватернион. Четыре переменных  $a, b, c, d$ , рассматриваемые как одна величина, в форме матрицы  $\begin{pmatrix} ab \\ cd \end{pmatrix}$ .

32. Статистическая механика Больцмана и Гиббса. В колоссальном ансамбле молекул, составляющих газ, практически невозможно проследить за движением каждой частицы. Но, рассматривая ансамбль в целом, удается определить его средние свойства. Например, предполагая, что молекулы непрерывно бомбардируют стенки сосуда, можно вычислить среднее значение силы, действующей на единицу поверхности стенки, т. е. давление газа. Больцман, задавшись значениями массы молекулы, ее скорости, числом молекул в 1 г вещества, выразил давление газа при некоторой температуре через скорость движения молекул, определил спектр скоростей, т. е. число молекул, имеющих заданные значения скорости движения, и в итоге показал, что можно вывести непротиворечивую количественную связь между наблюдаемыми величинами.

Тем самым, он нашел отправную точку статистической механики как учения, позволяющего с помощью рассмотрения вероятностных средних установить связь величин, определяемых на уровне обычных макроскопических масштабов, с миром механики микроскопических молекул. При этом выявилась важность идеи о том, что в ансамбле, содержащем огромное число частиц, в результате непрерывно происходящих столкновений в конце концов устанавливается равновесное состояние.

Вводя понятия теории вероятностей, Больцман заложил основы статистической механики, с помощью которой можно, исходя из механики микроскопических тел (молекул), вывести эмпирически наблюдаемые свойства макроскопических объектов. Больцман считал, что газ молекул в целом — реально существующий ансамбль, в котором каждую из невзаимодействующих молекул можно рассматривать как вероятностный объект. Гиббс, обобщив статистическую механику Больцмана, стал обращаться как с отдельным вероятностным объектом с системой в целом (например, с такой системой, в которой между молекулами есть взаимодействие). На этом пути Гиббс заложил фундамент обобщенной классической статистической механики. Ее развитие показало, что вещество, мельчайшие, невидимые глазом составные элементы которого совершают беспорядочное движение, в целом ведет себя упорядоченно; таким образом, по сравнению с ньютоновой механикой в понимании поведения вещества был сделан шаг вперед.

33. Векторные обозначения. Трехмерные векторы записывают в виде  $\vec{A}, \vec{B}$  или в виде  $A, B \dots$ . Величина  $A$  имеет три компоненты ( $A_x, A_y, A_z$ ), и при преобразовании координат новые значения компонент вектора определенным образом связываются с  $A_x, A_y, A_z$ .

34. Сила Кориолиса. Действует на тело, движущееся во вращающейся системе отсчета, например, системе, связанной с Землей. Вызывает горизонтальное отклонение (ее называют также отклоняющей силой). Пусть, например, тело движется вдоль меридиана от южного полюса к северному со скоростью  $v$ ; масса тела  $m$ , а угловая скорость вращения Земли  $\omega$ . Тогда на тело действует сила Кориолиса

$$F_K = 2mv \times \omega.$$

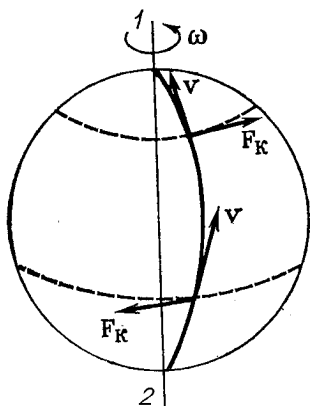
В южном полушарии она направлена на запад, в северном — на восток (см. рисунок). В каждой точке  $F_K$  направлена по касательной к параллели.

**35. Инерциальная система отсчета.** Система отсчета, в которой справедливы ньютоновы законы движения. Так как вблизи поверхности Земли в отсутствие внешних сил тела свободно падают, системе отсчета, связанную с Землей, нельзя считать инерциальной. Инерциальной не является также система, закрепленная на вращающемся круглом диске, поскольку в отсутствие внешних сил на тело в этой системе действует сила, направленная от диска.

**36.** Если ньютоново уравнение движения  $F=ma$  переписать в виде  $F-ma=0$ , то можно считать, что кроме внешней силы  $F$  на тело еще действует сила  $-ma$ , тогда динамическая задача превратится формально в статическую. При вращении возникает ускорение, направленное к центру и равное  $v^2/r$ , поэтому уравнение  $F=mv^2/r$  можно записать в виде  $F-mv^2/r=0$ . Величину  $-mv^2/r$  называют центробежной силой. Говорят, что это сила инерции. Силы инерции не являются реальными силами.

**37. Преобразование Лоренца.** Преобразование координат в частной теории относительности линейны относительно трех пространственных координат  $x, y, z$  и временной координаты  $t$ . Они отличаются тем, что определяют вращения и сдвиги не только в трехмерном, но и в четырехмерном пространстве, включающем время. Эйнштейн не вводил априори понятия одновременности. Вместо этого он подробно рассмотрел правила, по которым должны действовать наблюдатели при регулировке имеющихся у них часов. Время он определил с учетом относительного движения систем отсчета, в которых произошло событие и находятся наблюдатели. Преобразование Лоренца Эйнштейн вывел из двух аксиом: 1) скорость света в вакууме — постоянная величина, не зависящая от относительного движения источника света и наблюдателя (при условии, что движение происходит без ускорения); 2) физические законы в двух системах отсчета, движущихся друг относительно друга равномерно и прямолинейно, имеют совершенно одинаковую форму. Эти аксиомы эквивалентны требованию инвариантности всех физических законов относительно преобразования Лоренца. Результаты Эйнштейна получили подтверждение в мире атомных и ядерных явлений.

Лоренц вывел свое преобразование в конце прошлого столетия с целью устранить с помощью созданной им электронной теории противоречие между электродинамикой движущихся сред и опытом. Согласно преобразованию Лоренца, для покоящегося наблюдателя



Сила Кориолиса:  
1 — северный полюс Земли; 2 — южный полюс Земли

длина движущихся тел сокращается в направлении движения, а часы в движущейся системе отсчета отстают. Лоренцу нелегко было согласиться с таким удивительным результатом. Но после появления теории относительности эта точка зрения сначала была принята теоретически, а затем подтверждена экспериментами по движению элементарных частиц в ускорителях и по распаду элементарных частиц.

Ньютоновы законы движения имеют одинаковую форму для покоящегося наблюдателя и наблюдателя, движущегося относительно первого с постоянной скоростью. Например, если  $x, t$  обозначить координату и момент времени для самолета, наблюдаемого покоящимся служащим аэровокзала, а  $x', t'$  — то же, но для наблюдателя, сидящего в автомобиле, который движется относительно аэровокзала со скоростью  $v$  в положительном направлении оси  $x$ , то

$$x' = x - vt; \quad t' = t. \quad (1)$$

Если это преобразование (частный случай преобразования Галилея) применить к законам Ньютона, то закон, записанный с помощью  $x, t$  будет иметь такой же вид, как закон, сформулированный с помощью  $x', t'$ . Согласно частной теории относительности преобразование Лоренца для той же задачи будет иметь вид

$$x'_1 = \gamma(x_1 - \beta x_0); \quad x'_0 = \gamma(x_0 - \beta x_1). \quad (2)$$

Здесь  $x_1 = x$ ;  $x'_1 = x'$ ;  $x_0 = ct$ ;  $x'_0 = ct'$ ;  $\beta = v/c$ ;  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ .

Формулы (2) соответствуют частному случаю преобразования Лоренца. Законы механики должны быть инвариантны относительно этого преобразования. Из написанных формул вытекает, что для покоящегося наблюдателя длина движущихся тел сокращается, а интервал времени удлиняется в  $\gamma$  раз (явление так называемого лоренцева сокращения). При  $\gamma = \beta = 1$  формулы (2) переходят в (1), что соответствует предельному переходу  $v/c \rightarrow 0$ . Можно сказать, что преобразование Галилея справедливо, когда скорость  $v$  достаточно мала по сравнению с  $c$ .

**38. Пространство Минковского.** В 1907 г. немецкий математик Минковский построил геометрию, приспособленную для записи законов частной теории относительности, заложив тем самым основу дальнейшего развития этой теории. В ньютоновой механике время и обычное трехмерное евклидово пространство независимы друг от друга, а в частной теории относительности абстрагироваться от относительного движения систем отсчета (в которых происходят события и находятся наблюдатели) нельзя. Учитывая взаимосвязь времени и обычного трехмерного пространства, Минковский построил абстрактное четырехмерное пространство, в котором время и три пространственные координаты рассматриваются равноправно.

В этом пространстве Минковский определил псевдоевклидову метрику, напоминающую метрику обычного евклидова пространства с числом измерений, увеличенным на единицу. Вместо времени  $t$  он ввел координату  $x_0 = ct$  ( $c$  — скорость света в вакууме; остальные координаты  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$ . Событие изображается точкой этого четырехмерного пространства, траектория частицы, движущейся с постоянной скоростью — прямой линией, траектория света — парой прямых  $x_0^2 = x_1^2$  (см. рис. 3 основного текста книги). Физические законы, совместимые с частной теорией относительности,

в четырехмерном псевдоевклидовом пространстве Минковского сразу записываются в правильной (инвариантной) форме. Пространство Минковского нельзя представить себе наглядно, это — абстрактное пространство, конечно, можно изображать его графиками, напоминающими диаграммы движения поездов на железных дорогах, но все таки... Обычно пространство Минковского иллюстрируют рисунками, подобными рис. 3 основного текста книги, на котором ось  $x$  символизирует три  $x, y, z$ , а ось  $x_0$  направлена вверх (вертикально).

**39. Мировая линия.** Мгновенное положение частицы на траектории ее движения зависит от времени. О траектории, записанной во времени и пространстве примерно так же, как вычерчивают диаграмму движения поезда, говорят как о мировой линии частицы в четырехмерном пространстве. В теории относительности скорость частицы не может превзойти скорость света, поэтому мировая линия расположена в области  $v < c$ .

**40. Тахион.** Слово, происходящее от греческого  $\tauαχος$ , означающего «быстрый». Если допустить, что тахионы существуют, то они могут иметь в одной системе отсчета положительную, а в другой — отрицательную энергию и двигаться в отрицательном направлении оси времени. Результат может предшествовать причине, т. е. нарушается причинность. Поэтому считают, что в макром мире тахионы ненаблюдаемы (могут ли они существовать в микромире — другой вопрос).

**41.** Если поле сил консервативно, то, зная силу, можно определить потенциальную энергию. Обозначая  $-dA$  работу силы  $X$  на пути  $dx$ , получаем для одномерного поля сил

$$-dA = -Xdx. \quad (1)$$

Работу  $-dA$  можно рассматривать как приращение поля  $V$ , существующего в данной точке (поле  $V$  — источник энергии), т. е. считать, что  $dV = -dA$ . Например, в точке, удаленной от поверхности Земли на расстояние  $x$ , существует потенциал  $V = mgx$  и  $dV = -dA = -mgdx$ . Когда сила — трехмерный вектор  $F$ , формула (1) обобщается следующим образом:

$$dV = -dA = -(F_x dx + F_y dy + F_z dz) = -Fds. \quad (2)$$

Здесь потенциальная энергия — скаляр.

## ЛЕКЦИЯ 3

**42. Возможно отождествление во времени...** Имеется в виду ситуация, когда тело в некоторый момент времени идентично телу в другой, следующий, момент времени. Говорят, что в таком случае тело имеет «временную протяженность».

**43. Опыт Майкельсона—Морли.** Земля движется по орбите вокруг Солнца со скоростью около 30 км/с. В XIX в. это обстоятельство часто использовали при попытках обнаружить движения Земли сквозь эфир. В эксперименте, выполненном в 1887 г. американскими учеными Майкельсоном и Морли, измерялось смещение интерференционных полос, создаваемых двумя лучами, прошедшими по взаимно перпендикулярным оптическим путям. Точность опыта

позволяла наблюдать смещение порядка  $(v/c)^2$  ( $v$  — скорость Земли,  $c$  — скорость света). Тем не менее обнаружить смещение полос не удалось, и вопрос о существовании эфира экспериментально был решен отрицательно.

**44. Уравнения Гамильтона.** Одна из форм записи уравнений Ньютона (см. примеч. 30).

**45. Канонический формализм.** Формализм, позволяющий выразить аналогию классической механики с оптикой. В каноническом формализме рассматривают обобщенную координату частицы  $q$  и соответствующий ей канонический импульс  $p$ , а совокупность  $q, p$  называют каноническими переменными.

**Скобки Пуассона.** Если  $A=A(p, q)$ ,  $B=B(p, q)$  ( $q, p$  — координата и импульс), то

$$(A, B) \equiv \frac{\partial A}{\partial q} \frac{\partial B}{\partial p} - \frac{\partial A}{\partial p} \frac{\partial B}{\partial q}.$$

**Коммутатор**  $[A, B] = AB - BA$  (см. примеч. 83).

**46. Вероятностная интерпретация.** Состоит в утверждении, что квадрат модуля  $|\psi|^2$  волновой функции Шрёдингера  $\psi(x)$  дает плотность вероятности нахождения электрона в точке  $x$ .

**47. Гамма-лучевой микроскоп.** Разрешающая способность микроскопа (в частности, электронного) определяется формулой  $d = \lambda/a$ . Здесь  $d$  — минимальное расстояние, которое может быть разрешено;  $\lambda$  — длина волны света или электрона;  $a$  — числовая апертура. Чем меньше длина волны, тем выше разрешающая способность. Разрешающая способность обычных оптических микроскопов ограничена значениями порядка  $10^{-5}$  см, а электронных —  $10^{-8}$  см. Если бы удалось использовать  $\gamma$ -излучение, длина волны которого меньше, чем у электронов (принципиально это возможно, но технически очень трудно), то можно было бы с небольшой погрешностью ( $10^{-13}$  см) определять локализацию электрона.

**48. Эффект Комптона.** В 1922 г. американский ученый Комpton (1892—1962 гг.) в опытах по рассеянию рентгеновского излучения парафином обнаружил, что длина волны рассеянного излучения, вообще говоря, больше длины волны падающего. Проводя детальные измерения, он дал прямое экспериментальное доказательство корпускулярной природы света. Ранее Планк (1900 г.) и Эйнштейн (1905 г.) предложили квантовую теорию света, согласно которой свет ведет себя, как частица с энергией  $E$  и импульсом  $p$ , где

$$E = h\nu; \quad p = h/\lambda \quad (1)$$

( $\nu$  — частота;  $\lambda$  — длина волны света). Пользуясь этой идеей, Бор (1913 г.) создал теорию атомных спектров, но это были косвенные свидетельства корпускулярной природы света. Надо отметить, что корпускулярную теорию света предлагал еще Ньютон, исходящий из фактов прямолинейного распространения, преломления и отражения света.

Применяя с учетом формул (1) законы сохранения энергии и импульса к столкновению светового кванта с электроном, можно вывести следующее соотношение между длинами волн рассеянного и падающего света  $\lambda'$  и  $\lambda$ :

$$\lambda' = \lambda [1 + (\lambda_0/\lambda) (1 - \cos \theta)]. \quad (2)$$

Здесь  $\lambda_0 = h/mc \approx 2,4 \cdot 10^{-10}$  см — величина того же порядка, что и длина волны рентгеновского излучения;  $\theta$  — угол между направлениями падающего и рассеянного света. Из формулы (2) видно, что при  $\theta=0$   $\lambda' = \lambda$ , а при возрастании  $\theta$  длина волны  $\lambda'$  становится больше  $\lambda$ . Длины волны  $\lambda$  видимого света гораздо больше  $\lambda_0$ , поэтому рассматриваемый эффект не могли обнаружить. В рентгеновской области  $\lambda$  меньше, и эффект можно измерить. Величина  $\lambda_0$  имеет смысл протяженности электрона относительно длины волны света, ее называют комптоновской длиной волны.

Выше рассказано об открытии корпускулярных свойств света, волновая природа которого была до этого общепризнана. Однако де Бройль выдвинул утверждение (1925 г.), что электрон, корпускулярная природа которого не вызывала сомнений, обладает волновыми свойствами. Впоследствии это было подтверждено. Наличие как корпускулярных, так и волновых свойств у электронов и света явилось важным стимулом для разработки квантовой механики.

**49. Соотношение неопределенностей.** Обозначим  $(\Delta x)^2$  среднее значение величины  $(x - \bar{x})^2$ , где  $\bar{x}$  — среднее значение координаты, а  $(\Delta p)^2$  — среднее значение  $(p - \bar{p})^2$ , где  $\bar{p}$  — среднее значение импульса. Тогда можно доказать, что в квантовой механике

$$\Delta x \cdot \Delta p > \hbar/2.$$

**50. Амплитуда вероятности.** Волновая функция  $\psi$ , так как  $|\psi|^2$  — плотность вероятности.

**51. Работы Борна.** Борн впервые рассмотрел задачу рассеяния с использованием уравнения Шрёдингера, предложил вероятностную интерпретацию волновой функции.

**52. Геометрическая оптика.** Геометрическая оптика сыграла важную роль в становлении современной физики. Из основного принципа геометрической оптики (свет распространяется по кратчайшему пути) возник принцип наименьшего действия, ставший инструментом перехода от ньютоновой механики к аналитической механике Лагранжа (включая канонический формализм Гамильтона) и позволивший навести мост к квантовой механике мира атомов. Корпускулярные и волновые свойства — одинаково важные «опоры» квантовой теории света. В геометрической оптике дается элементарное описание свойств света, связанных с его корпускулярностью. Приближение геометрической оптики полезно при первоначальном ознакомлении с квантовой механикой.

**53. Волновой монизм.** Философская концепция, согласно которой все сущее в природе представляет собой волны. Согласно де Бройлю и Шрёдингеру электрон, подобно свету, тоже является волной. Волновая функция — не что иное, как настоящая волна.

**54. Расплывание электрона.** Учитывая, что электрон представляет собой волну, и пользуясь уравнением Шрёдингера для свободных частиц, можно показать, что даже если в начальный момент электрон сосредоточен в одной точке, то в последующие моменты времени он будет постепенно распространяться во все стороны.

**55. Интерпретация Бом.** Английский физик Бом утверждает, что квантовую механику можно интерпретировать причинно. Бом выполнил ряд работ по теории колебаний многоэлектронной плазмы, занимался моделью элементарных частиц, как недеформируемых твердых тел и т. д.

**56. Борн и Иордан.** Эти ученые заметили, что с математической точки зрения физические величины квантовой теории Гейзенберга



являются матрицами. Иордан совместно с Вигнером и Клейном опубликовал ряд статей о вторичном квантовании.

**57. Модель ДНК Крика — Уотсона.** В 1953 г. Уотсон и Крик, основываясь на данных по дифракции рентгеновского излучения, полученных Уилкинсом, предложили модель структуры ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты). Согласно этой модели две цепи полинуклеотидов, соединенные между собой водородными связями, образуют так называемую двойную спираль, напоминающую катушку соленоида. Водородные связи соединяют основания четырех видов, входящие в структуру полинуклеотидов; связи могут устанавливаться только между определенными, дополнительными основаниями. Последнее обстоятельство гарантирует, что при редупликации молекулы ДНК последовательность оснований в новой молекуле в точности повторяет последовательность оснований исходной молекулы ДНК.

**58.** Пусть  $(x, y, z)$  — координаты некоторой частицы. Тогда волновая функция этой частицы есть  $\psi(x, y, z, t)$ . Далее, если  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$  — координаты двух частиц, то волновая функция  $\psi = \psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2; t)$  кроме времени зависит еще от шести переменных. Аналогично для трех частиц с координатами  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $(x_2, y_2, z_2)$ ,  $(x_3, y_3, z_3)$  волновая функция, кроме времени, зависит еще от девяти переменных.

**59.** Статья Иордана и Клейна, в которой они разработали метод квантования волнового поля в задаче многих тел **Jordan J., Klein O. — Z. Phys., 1927, Bd 45, S. 751—765.**

**60. Вторичное квантование.** Метод квантования волнового поля, т. е. метод приписывания волновому полю корпускулярных свойств

**61. Квантовая электродинамика.** Квантовая механика электронного и электромагнитного полей. Теория в данном случае очень хорошо согласуется с экспериментом. В квантовой электродинамике с большим успехом применен метод перенормировок Томонага — Швингера (см. примеч. 85), разработанный ими после второй мировой войны.

**62. Статистики Бозе и Ферми.** В квантовой теории частицы одного сорта неразличимы. Существует два типа заполнения состояний: либо в одном состоянии может находиться не более одной частицы, либо — сколько угодно частиц. Соответственно различаются и способы подсчета числа расположенных большого количества одинаковых частиц по состояниям. Это обстоятельство имеет важное значение для вывода функции распределения частиц. В одном состоянии не может находиться более одного электрона или другой частицы с полуцелым спином; эти частицы подчиняются статистике Ферми (ферми-частицы, или фермионы). Частицы с целым спином, например фотоны, подчиняются статистике Бозе (бозе-частицы, или бозоны). Число бозонов в одном состоянии может быть любым.

**63.** Квантовая теория релятивистских локальных полей (см. примеч. 80) инвариантна относительно последовательности преобразований времени ( $T$ ), пространства ( $P$ ) и зарядового сопряжения ( $C$ ). Это утверждение известно, как *CPT*-теорема.

**64. Унитарность.** В задаче рассеяния частиц  $S$ -матрица (см. примеч. 94) связывает состояния частиц до взаимодействия с состояниями после взаимодействия, т. е. с состояниями, в которых провзаимодействовавшие частицы уже достаточно удалились друг от друга. Унитарность — неотъемлемое свойство  $S$ -матрицы. Если

унитарности нет, то сумма вероятностей состояний, возникающих после рассеяния, не равна 1.

**65. Причинность.** Под причинностью обычно понимают, что следствие не может предшествовать причине. Например, в задаче рассеяния падающая на мишень волна не может достичь мишени позже, чем из нее выйдет расходящаяся волна. Испускаемая мишенью волна образуется только после того, как падающая волна достигнет мишени. В частной теории относительности воздействия, изменяющие физическое состояние, не могут распространяться со скоростью, превышающей скорость света. Отсюда вытекает, что две точки, разделенные пространственно-подобным интервалом (см. примеч. 81), полностью независимы, т. е. не могут влиять друг на друга. Об этом иногда говорят, как о микропричинности.

**66. Симметрия.** Этот термин почти эквивалентен термину *инвариантность*. Если в результате какой-либо операции объект полностью совмещается сам с собой, то говорят о симметрии.

**67. Спинор.** Различные геометрические величины, например векторы, скаляры, изменяются при лоренц-преобразованиях (или трехмерных вращениях) каждая по своему закону. Понятие *спинор* впервые вошло в физику при создании квантовой механики. Он имеет две комплексные составляющие, изменяющиеся при преобразованиях координат по закону, отличному от законов преобразования векторов или скаляров. Волновая функция электрона — спинор. Наличие двух компонент указывает на то, что электрон может иметь в пространстве не более двух ориентаций.

**68. Принцип эквивалентности.** Если лифт начинает свободно падать после того, как перерезали трос, на котором он висел, то люди, находящиеся в лифте, оказываются в состоянии невесомости. Но если такой человек будет наблюдать за происходящим вне лифта, то он обнаружит, что там по-прежнему действует сила тяжести, как будто бы лифт и не падал. Следовательно, действие силы тяжести всегда можно полностью исключить, но только в ограниченной, небольшой области пространства. Это утверждение называют принципом эквивалентности.

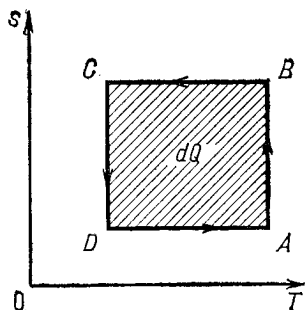
**69. Риманова геометрия.** В обычной евклидовой геометрии интересуются свойствами фигур на плоскости и в неискривленном трехмерном пространстве, а также характеристиками этого пространства. Риман рассмотрел свойства искривленных подобно поверхности сферы пространств и свойства фигур в таких пространствах и показал, что при этом возникает еще одна, вполне логичная геометрия. В евклидовой геометрии через точку вне прямой можно провести лишь одну прямую, параллельную данной (аксиома о параллельных), в римановой геометрии число таких прямых может быть любым.

**70. Энтропия.** В середине XIX в. немецкий физик-теоретик Клаузиус (1821—1888 гг.), изучавший закон превращения теплоты в работу (второй закон термодинамики), ввел термин *энтропия* для обозначения величины, характеризующей тепловое состояние тела. По гречески «энтропия» означает «круговорот», «взаимный переход». Обычно энтропию обозначают символом  $S$ . До тех пор, пока тепло, сообщенное извне газу, не распределится в нем совершенно равномерно, энтропия газа возрастает, а в равновесном состоянии она имеет некое определенное значение.

Энтропия — сложная характеристика состояния, ее нелегко понять в рамках термодинамики. Ясную интерпретацию ей впервые

дали в статистической механике. Больцман рассматривал газ, как ансамбль огромного числа беспорядочно движущихся молекул. Равновесное состояние ансамбля достигается в результате бесчисленных столкновений молекул газа, а макроскопические характеристики вещества определяются статистическим усреднением микроскопических движений молекул. Если  $W$  — число состояний беспорядочного микроскопического движения молекул, то энтропия определяется формулой  $S = k \ln W$ . Здесь  $k$  — постоянная Больцмана;  $kT/2$  — средняя кинетическая энергия  $mv^2/2$  при температуре  $T$ , приходящаяся на одну степень свободы.

То обстоятельство, что энтропия выражается через  $\ln W$ , приводит к аддитивности этой величины. Число состояний в смеси двух газов определяется произведением  $W_1 W_2$ . После логарифмирования получается, что энтропия смеси  $S = S_1 + S_2$ , как и должно быть согласно термодинамике. В квантовой статистике при учете тождественности частиц способ подсчета числа состояний коренным образом изменяется, но понятие энтропии сохраняет прежний смысл.



Работа  $dQ$ , производимая при четырех движениях поршня паровой машины, дается площадью этого четырехугольника:

**A → B** — расширение при постоянной температуре, энтропия возрастает ( $dS > 0$ ); **B → C** — адиабатическое расширение, энтропия постоянна ( $dS = 0$ ); **C → D** — сжатие при постоянной температуре, энтропия уменьшается ( $dS < 0$ ); **D → A** — адиабатическое сжатие, энтропия постоянна ( $dS = 0$ ).

Так же, как энергия, энтропия — понятие, без которого невозможно обойтись при статистической интерпретации физических явлений. Особенность энергии состоит в том, что при физических изменениях она всегда сохраняется. Если кажется, что закон сохранения энергии нарушен, то значит не учтен какой-либо фактор. Энтропия характеризует степень нарушения упорядоченности физической системы, указывает направление физических изменений. Если физическая система предоставлена самой себе, то в ней, вообще говоря не происходит изменений, приводящих к уменьшению энтропии. Чем регулярнее и упорядоченнее физическая система, чем эффек-

тивнее она может совершать работу над другими физическими системами, тем ниже ее энтропия (см. рисунок). Для понижения энтропии необходимо взаимодействие системы с окружением через внешнюю границу для увеличения беспорядка в окружающей среде. Живые существа, взаимодействуя с окружающей средой, непрерывно понижают свою энтропию, можно сказать, что это — условие сохранения жизни.

**71. Метрический тензор пространства.** Размер физического тела и интервал времени, вообще говоря, изменяются при переходе из одной точки пространства — времени в другую. Поэтому и расстояние  $ds$  между некоторой точкой и соседними с ней точками зависит от положения этой точки в пространстве — времени. Величину

характеризующую зависимость масштаба расстояний от положения точки в пространстве, называют метрическим тензором.

**72. Геодезические, большой круг.** Кратчайшую среди всех линий, соединяющих две точки в некотором пространстве, называют геодезической этого пространства. В евклидовом пространстве геодезические — прямые линии, а в римановом — вообще говоря, кривые. На сфере геодезическими служат дуги большого круга. Большой круг, по определению, есть линия пересечения сферы с плоскостью, проходящей через центр сферы.

**73. Урбарионы.** Наиболее фундаментальные составные части, из которых, по предположению, построены наблюдаемые элементарные частицы (имеется в виду, что они составляют основу барионов).

**74. Кварки.** Как фундаментальные компоненты, из которых построены элементарные частицы, введены в рассмотрение в 1964 г. Их электрический заряд составляет  $1/3$  и  $2/3$  заряда электрона. Предприняты многочисленные попытки экспериментального обнаружения кварков, но никаких признаков их существования пока не найдено.

**75. Уравнение Эйнштейна:**

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = \kappa T_{\mu\nu}.$$

**76.** Для квантования физической величины ее нужно заменить подходящим оператором.

**77. Гравитон.** Свет представляет собой электромагнитное поле. Экспериментально установлено, что его энергия выделяется порциями и он обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Элементарную порцию света называют фотоном. Развита квантовая теория фотонов и электронов. Естественно, появился вопрос: не ведет ли себя квант гравитационного поля как частица, подобно кванту электромагнитного поля? Таким образом возникло понятие *гравитон*. В отличие от фотонов, гравитоны не обнаружены экспериментально, это — гипотетические частицы. Исходя из свойств гравитационного поля, гравитону приписывают массу 0, две компоненты, спин 2. Существует также мнение, что гравитационное поле квантовать не следует, а рассматривать его всегда как классическое поле.

**78. Решение Шварцшильда.** Немецкий астроном, занимавшийся математической физикой, Шварцшильд нашел (1916 г.) точное решение уравнения Эйнштейна для статического центрально-симметричного поля.

**79. Черная дыра.** Такая дыра, из которой не может выйти никакое тело, однажды в нее провалившееся. Согласно общей теории относительности, в окрестности черной дыры существенно изменяются структура и свойства пространства-времени. Полагают, что черными дырами являются открытые недавно нейтронные звезды.

**80. Локальное поле.** Описывается конечным числом функций  $\phi_a(x, y, z, t)$ , зависящих от координат  $x, y, z, t$  только одной точки в четырехмерном пространстве — времени. Электромагнитное поле выражается антисимметричным тензором, имеющим шесть независимых компонент, а электрон представляется четырехкомпонентным дираковским спинором  $\phi_a(x)$  ( $a = 1, 2, 3, 4$ ).

**81. Пространственно-подобный, времениподобный.** Две точки называют пространственно-подобными, если их нельзя связать взаи-

модействием, распространяющимся со скоростью, не превышающей (или равной) скорости света. Например, на рис. 5 пространственно-подобными относительно начала отсчета являются точки в заштрихованной области. Времениподобными называют точки, которые можно связать взаимодействием, распространяющимся со скоростью, меньшей скорости света (на рис. 5 точки, времениподобные относительно начала отсчета, лежат в незаштрихованной области). Поскольку в частной теории относительности физические воздействия не могут распространяться со скоростью, большей скорости света, две пространственно-подобные точки можно совместить во времени.

**82. Световой конус.** Область, точки которой можно связать с данной точкой взаимодействием, распространяющимся со скоростью света, вообще говоря, является конусом (гиперконусом). Его называют световым конусом данной точки (см. рис. 5). На плоскости этот конус вырождается в пару прямых  $x = \pm ct$ . В четырехмерном пространстве световой конус — геометрическое место точек, удовлетворяющих уравнению

$$ct = \pm \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

**83. Коммутатором величин  $A$ ,  $B$**  называют разность  $AB - BA$ ;  $AB + BA$  — антикоммутатор. Коммутаторы используют для бозе-полей, а антикоммутаторы — для ферми-полей. Микропричинность выражается требованием, чтобы антикоммутаторы ферми-полей обращались в нуль для пар пространственно-подобных точек.

**84. Гиперплоскость нулевой толщины.** Поверхность в четырехмерном пространстве-времени, образованная взаимно пространственно-подобными точками (эта поверхность трехмерна), называют пространственно-подобной гиперплоскостью. Если на этой поверхности задать состояние механической системы (такое состояние называют начальными условиями), то следующие за ним состояния можно определить из уравнения Томонага — Швингера.

**85. Уравнение Томонага — Швингера.** Квантовомеханическое уравнение, при записи которого в каждой точке введено локальное время и которое полностью локально выражает изменения состояния движения системы. О нем говорят также, как о сверхмноговременном формализме. Уравнение записано в явно релятивистски инвариантной форме.

**86. Конечные разности, уравнения в конечных разностях.** Обычно физические законы формулируют с помощью дифференциальных уравнений, выражающих связь между величинами в некоторый момент времени  $t$  и близкий к нему следующий момент  $t + \Delta t$  ( $\Delta t$  бесконечно мало). Рассмотрим только состояния в момент  $t$  и момент  $t + a$ , стоящий от  $t$  на конечный интервал, и будем интересоваться изменениями за конечный промежуток времени. Так как  $a$  — конечная величина, говорят о конечной разности, а уравнение, определяющее изменения между этими моментами времени, называют уравнением в конечных разностях. Например, запись

$$\{[v(t + \Delta t) - v(t)]/\Delta t\}_{\Delta t \rightarrow 0} = 0$$

означает, что в произвольный момент времени величина  $v$  постоянна, а уравнение в конечных разностях

$$v(t + a) - v(t) = 0$$

означает лишь то, что величина  $v$  одинакова в моменты  $t$  и  $t+a$ . О том, каково  $v$  в промежуточные моменты времени, уравнение не дает информации.

87. Katayama Y., Yukawa H. Field Theory of Elementary Domain and Particles. I. — Progr. Theor. Phys. Supplement, 1968, № 41, p. 1—21; Katayama Y., Umemura J., Yukawa H. Field Theory of Elementary Domain and Particles. II. — Ibid., p. 22—55.

88. Naka S. — Progr. Theor. Phys., 1972, v. 48, p. 1024.

89. **Дуальность.** Между процессами рассеяния сильно взаимодействующих частиц при высоких энергиях и резонансами при низких энергиях есть тесная связь, убедиться в существовании которой можно, если заметить, что матрица рассеяния не изменяется при замене времениподобного направления пространственно-подобным. Поэтому говорят, что процессы при высоких энергиях и резонансы при низких энергиях дуальны.

90. **Метрика гильбертова пространства.** Состояние системы в квантовой механике определяется вектором в бесконечномерном векторном пространстве. Обычно длина этого вектора положительна. Но бывают случаи, когда теорию можно выразить более ясно и сжато, если рассмотреть пространство, в котором длина вектора отрицательна. Чтобы различать векторы положительной и отрицательной длины, вводят метрику векторного пространства. Поскольку длина вектора имеет вероятностную интерпретацию, непосредственно истолковать смысл векторов, имеющих отрицательную длину, очень трудно.

91. В обычной теории поля давно возникли трудности с бесконечными величинами. Например, в теории локального поля бесконечно велика собственная энергия (в электродинамике это энергия взаимодействия электрона с создаваемым им самим электромагнитным полем).

92. **Индефинитная метрика.** Метрика векторного пространства, в котором длина вектора может быть как положительной, так и отрицательной.

93. Длина вектора в гильбертовом пространстве имеет смысл относительной вероятности состояния, соответствующего этому вектору. Если длина вектора отрицательна, то возникает отрицательная вероятность, что противоречит основному свойству вероятности.

94. **S-матрица.** Матрица, связывающая начальное и конечное состояния рассеяния.

95. Обычно при вторичном квантовании пользуются операторами рождения и уничтожения частицы, действующими в точках трехмерного пространства в один и тот же момент времени. Свойства этих операторов в другие моменты времени определяются уравнениями движения Гейзенберга. А при четырехмерном квантовании применяют операторы рождения и уничтожения в каждой точке в разные моменты времени, поэтому операторы полностью независимы.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию . . . . .	3
Вступительное слово организатора лекций проф. Хара . . .	4
Вступление . . . . .	5

### Лекция 1

Удивительность мира элементарных частиц . . . . .	6
Что можно почерпнуть из истории науки? . . . . .	7
О первоисточниках . . . . .	8
Легенда о Ньюtone как человеке не от мира сего . . . . .	10
Взгляд Ньютона на вещество . . . . .	12
Внутренние стимулы творчества . . . . .	14
«Глубинный порядок» по Гейзенбергу . . . . .	15
Материальная точка и твердое тело . . . . .	17
О моменте количества движения . . . . .	19
О деформациях и напряжениях . . . . .	20
Физика: «Экономия мышления»? . . . . .	22
Дальнодействие и близкодействие . . . . .	25
Решение Максвелла . . . . .	27

### Лекция 2

Классификация ученых — одиночки, полемисты, коллективисты	
О пользе конференций . . . . .	28
Пространство в ньютоновой механике . . . . .	30
Из истории векторов . . . . .	32
«Имена» точек пространства . . . . .	33
«Реальные» и «фиктивные» силы . . . . .	35
Об интерпретации Маха . . . . .	37
Величие Ньютона . . . . .	38
Об абсолютной системе отсчета . . . . .	40
О понятии поля . . . . .	40
Поле в теории относительности . . . . .	41
Об ограничениях, накладываемых частной теорией относительности . . . . .	43
Причинность в ньютоновой механике — демон Лапласа . . . . .	45
Лаплас и его эпоха . . . . .	46
О причинности в частной теории относительности . . . . .	48
	50

### Лекция 3

Квантовая «теория» и квантовая «механика» . . . . .	54
Волны: от эфира к полю . . . . .	55
Два вывода соотношения неопределенностей . . . . .	57
Теория познания и физика . . . . .	60
Расплывание электрона . . . . .	62
Отход от классической причинности . . . . .	64
Шрёдингеровский кот . . . . .	66
Завершение квантовой механики — квантовая теория поля . . . . .	69
Квантовая механика и частная теория относительности . . . . .	71
«Одинокая» и «возвышенная» теория (об общей теории относительности и общей ковариантности) . . . . .	72
Отождествление физических и геометрических величин . . . . .	74
«Вместилище» (пространство-время) и «содержимое» (вещество) . . . . .	75
Верно ли, что общая теория относительности не имеет отношения к микромиру? . . . . .	78
Теория элементарных частиц — локальные и нелокальные поля . . . . .	81
О конечных разностях . . . . .	83
О непрерывности и скачкообразности при познании внешнего мира . . . . .	90
<b>Вопросы и ответы</b> . . . . .	92
<b>Заключение</b> . . . . .	97
<b>Примечания</b> . . . . .	100