

Х.Юкава **ЛЕКЦИИ
ПО ФИЗИКЕ**

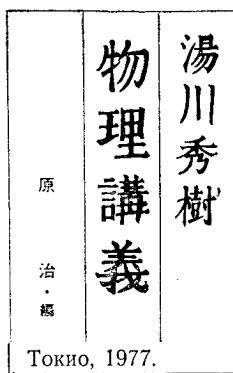
ЭНЕРГОИЗДАТ

X. 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 20408-524
051(01)-81 9-81(А). 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 Сольвеевских 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, ценные 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 захватывающее 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 послушать 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.

В С Т У П Л Е Н И Е

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 представляю 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 ньютона 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, μ -мезон — частица, очень похожая на электрон. Разве не удивительно, что существуют точно две (электрон и μ -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 μ -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 содержит в себе и разнообразен. Объекты, поначалу представлявшиеся 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. Прошлое 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 аудитории*) 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 ньютона 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 Ньютона, 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 потрясаet 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 Ньютоне 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, ньютона 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 связанным 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 Ньютоне. 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 ньютоновской механики в школе ощущение реальности Ньютона как человека совершенно исчезает.

Недавно я ознакомился с другими рассказами о Ньютоне, 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 не свойственны 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 назвали 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. Идеи 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 быть 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 Ньюトン верил не в себя, а в Бога. Его Бог — правитель, 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 перескакивали 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 натуралистики. 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 современному идеям.

Правильные многогранники — тела, имеющие наивысшую симметрию. Гейзенберг же интересовался законом наиболее глубокого упорядочения естественного мира, искал закон, выражавший скрытую симметрию. Поиски этой симметрии выявили 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 прийти 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, напишем $L=mvr$. 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 ω , вообще говоря, возрастает при уменьшении r . По какому закону стремится ω к бесконечности? Если v ограничено, то $L\rightarrow 0$. Даже при увеличении v может оказаться, что произведение $mr^2\omega$, выраждающее 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 противоречия.

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 ньютоновской 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 чудовищно 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 сохраняться. 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 специальной школе повышенного типа, с ее кошмарной дрессировкой? Правда, если хорошенеко подумать, вопрос этот — тоже вопрос без ответа (*смех*). Тренировка, конечно, неизбежна. Но так приятно чувствовать себя хоть немного свободным. Не в том ли состоит прелест 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 пространство

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 маxовским 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 ньютона 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 работы Гельмгольца называлась «О сохранении силы». Так что даже у Гельмгольца слово *сила* не имело того смысла, который мы приаем

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 скажал 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 давлю 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 наитию, 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 дальнодействие к близкодействию невозможно; поэтому при одном из способов вывода дальнодействия 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 дальнодействия, 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 дальнодействия именно в силу его мистической природы. Отстаивала дальнодействие школа Ньютона, в основном английские ученые. В конце концов восторжествовала прагматическая точка зрения о бесполезности эфира и близкодействия, и при построении механики стали смело пользоваться именно дальнодействующими силами.

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

Решение Максвелла

Что же стало с задачей о дальнодействии и близкодействии? Ее решение исходит от Фарадея и принадлежит Максвеллу. Но Максвелл дал решение для электромагнитных, а не гравитационных сил. С работ Максвелла началось возрождение сил близкодействия (за основу было взято электромагнитное поле) и теперь «язык дальнодействия», по-видимому, забыт. Правда, изучение электромагнетизма мы начинаем с опыта, в котором маленькие кусочки бумаги подскакивают 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 дальнодействия, например закон Био—Савара. Интерпретация явлений с помощью дальнодействующих 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 дальнодействующей.

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 дальнодействующих 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 одиночек 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 Броиля. 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, напоминавшую споры далекого прошлого с участием Сократа и Платона. Греки любили спорить. В частности, Аристотель, облекавший 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 — коллектисты. 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 устрашающее 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

споря 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 профессорскую 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 Эренфест.

Планк и Эйнштейн выступили на конгрессе с обоснованием квантовой теории, казавшейся очень странной физикам старшего поколения, в частности Лоренцу и Эренфесту. 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 собирались главным образом европейские физики и число участников было невелико, но постепенно конгрессы становились все крупнее и изменялся, если можно так выражаться, 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 дээн (*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 илисылаемся 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 ω ограничена, то при уменьшении r момент количества движения L стремится к нулю. А при увеличении ω 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 кафедры физики высоких энергий в Университете Цукуба).

Идеи Гиббса об использовании векторов не получили немедленного признания. Например, уже упомянувшийся 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 заменную 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 непринципиальном 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. Сово-купность 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 движущейся системы отсчета относительно начала координат неподвижной системы отсчета. В противном случае язык пространства не был бы универсален.

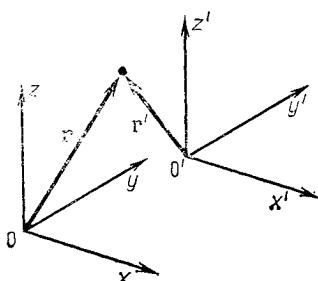


Рис. 1

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

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

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 выглядят 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, обратны и симметричны. Об этом говорят, как о кинематической относительности. Равнозначность 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 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 разделения 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 нью顿овой 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 покойится. 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 Ньютона 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 гравитационное; 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

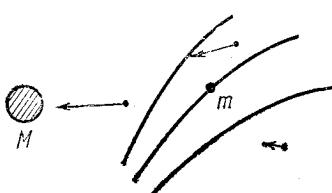


Рис. 2

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 дальнодействия и близкодействия. 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)-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. *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.

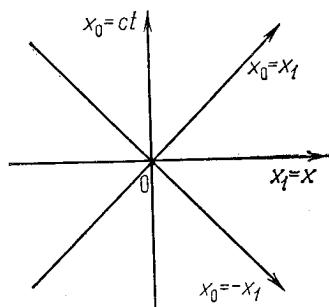
Но пока мы не пользуемся квантовым языком, а говорим о теории относительности в ее макроскопическом понимании, событие может длиться в течение конечного интервала времени и происходить сразу во многих пространственных точках, а его содержание может быть совсем простым, например событие может означать, 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 \mathbf{E}, \mathbf{H} . 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

Рис. 3



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 ньютоновской механике. Короче, считали, что существует одна, очень общая фундаментальная причина движения.

С созданием ньютоновской 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.

Уравнения движения в ньютоновской 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. Состояние 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 ньютоновской механики впервые представил Лаплас. Он же придумал демона (о котором вы, может быть, слыхали), 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

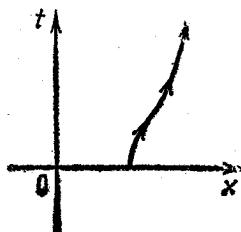


Рис. 4

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 вздрогнули (*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 pragmatиком. 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

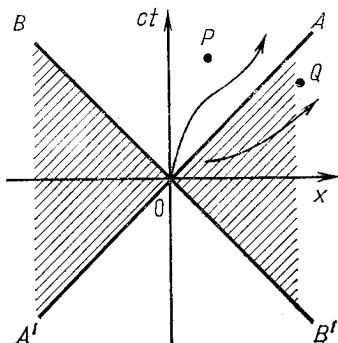


Рис. 5:

$B'OB$, $A'OA$ — 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 заменителя пользуемся евклидовой плоскостью. Чересчур доверяясь этой модели, можно наделать ошибок, но мож-