



БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •  
выпуск 67

Я.Б. ЗЕЛЬДОВИЧ  
М.Ю. ХЛОПОВ

# ДРАМА ИДЕЙ В ПОЗНАНИИ ПРИРОДЫ







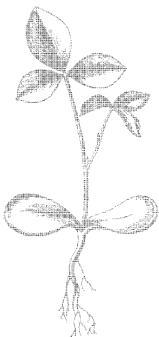
**БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •**  
**выпуск 67**

---

**Я.Б. ЗЕЛЬДОВИЧ**  
**М.Ю. ХЛОПОВ**

# **ДРАМА ИДЕЙ В ПОЗНАНИИ ПРИРОДЫ**

**ЧАСТИЦЫ  
ПОЛЯ  
ЗАРЯДЫ**



**МОСКВА «НАУКА»**  
**ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ**  
**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**  
**1988**

ББК 22.382  
3-50  
УДК 539.1 (023)

Серия «Библиотечка «Квант»  
основана в 1980 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик **Ю. А. Осипьян** (председатель), академик  
**А. Н. Колмогоров** (заместитель председателя), кандидат фи-  
зико-математических наук **А. И. Буздин** (ученый секретарь),  
академик **А. А. Абрикосов**, академик **А. С. Боровик-Романов**,  
академик **Б. К. Вайнштейн**, заслуженный учитель РСФСР  
**Б. В. Воздвиженский**, академик **В. Л. Гинзбург**, академик  
**Ю. В. Гуляев**, академик **А. П. Ершов**, профессор **С. П. Капица**,  
академик **А. Б. Мигдал**, академик **С. П. Новиков**, академик  
АПН СССР **В. Г. Разумовский**, академик **Р. З. Сагдеев**, про-  
фессор **Я. А. Смородинский**, академик **С. Л. Соболев**, член-кор-  
респондент АН СССР **Д. К. Фаддеев**

Рецензент

доктор физико-математических наук *М. Б. Волошин*

**Зельдович Я. Б., Хлопов М. Ю.**

3-50 Драма идей в познании природы (частицы,  
поля, заряды). — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.  
лит., 1988. — 240 с. — (Б-чка «Квант»; Вып. 67)  
ISBN 5-02-013878-9

На примере развития физики прослежена драма познания природы. Герои этой драмы — физические идеи, для которых смена основных физических представлений сохраняет непреходящее значение каждого этапа их развития. В ходе развития физики такие понятия, как элементарная частица, поле, заряд, претерпевают существенное изменение, обретая все более глубокое обобщенное значение. Но смысл этих понятий, отвечающий каждому этапу их развития, сохраняется как разумное физическое приближение для широкого круга задач и на современном этапе. Анализ изменения этих понятий подводит читателя к самым современным представлениям о структуре микромира, о природе тяготения и о фундаментальном единстве сил природы.

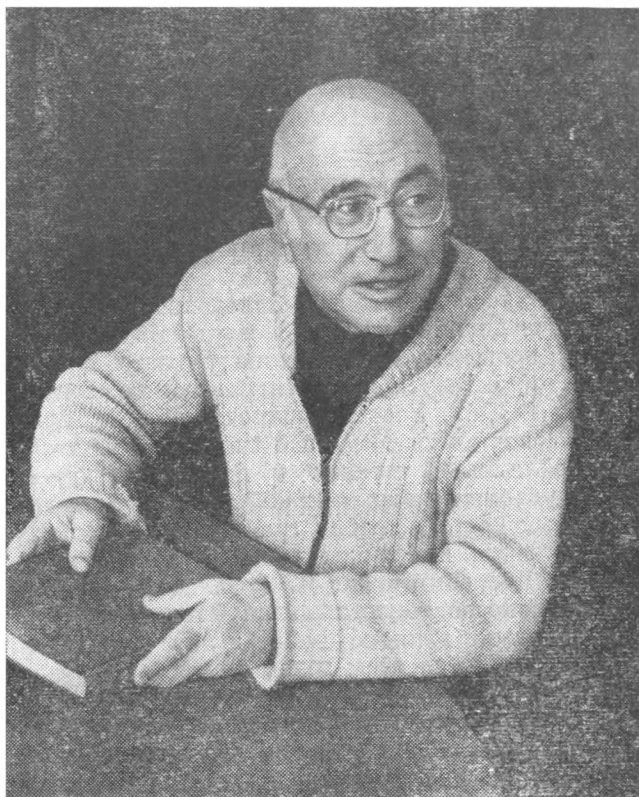
Изложение доступно самому широкому кругу читателей.

3 1704020000—143 178-88  
053(02)-88

ББК 22.382

ISBN 5-02-013878-9

© Издательство «Наука»  
Главная редакция  
физико-математической  
литературы, 1988



**ЯКОВ БОРИСОВИЧ ЗЕЛЬДОВИЧ**  
(1914—1987)

## ЯКОВ БОРИСОВИЧ ЗЕЛЬДОВИЧ

2 декабря 1987 года, когда рукопись этой книги была уже сдана в типографию, на 74-м году оборвалась жизнь Якова Борисовича Зельдовича.

Я. Б. Зельдович родился 8 марта 1914 года в г. Минске, прошел школу Ленинградского физико-технического института и Института химической физики АН СССР. Ученый широчайшего профиля Я. Б. Зельдович внес громадный вклад в становление современной теории горения и детонации, физики взрыва и ударных волн, ядерной физики и физики элементарных частиц, теории гравитации и космологии, астрофизики высоких энергий и рентгеновской астрономии. Неоценим вклад Я. Б. Зельдовича в обеспечение обороноспособности нашей Родины.

Общепризнано влияние работ Я. Б. Зельдовича на развитие науки во всем мире, многие из полученных им результатов стали классическими, а его монографии — учебниками. Он был избран членом более десяти иностранных академий и научных обществ.

Коммунистическая партия и Советское государство высоко оценили заслуги Я. Б. Зельдовича. Он трижды удостоивался звания Героя Социалистического Труда, награжден тремя орденами Ленина, орденами Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, другими наградами. Я. Б. Зельдович — лауреат Ленинской и Государственных премий СССР.

Страстная преданность науке, чуткость и доброжелательность к людям снискали Я. Б. Зельдовичу заслуженное уважение и авторитет. Светлая память о выдающемся советском ученом Я. Б. Зельдовиче навсегда сохранится в сердцах советских людей.

## ВВЕДЕНИЕ

---

Эйнштейн был возбужден мыслью о нашей \*) книге. «Это драма, драма идей, — сказал он. — Наша книга должна быть интересной, захватывающей для каждого, кто любит науку.»

*Леопольд Инфельд.*

«Мои воспоминания об Эйнштейне»

Мир многолик, он многообразен, изменчив, полон неожиданностей. Каждый окружающий нас предмет обладает только ему одному присущими чертами и не тождественен другому подобному предмету. Невозможно найти два совершенно одинаковых дерева, два совершенно одинаковых камня. Даже две капли воды немного отличаются одна от другой. Явления окружающей нас Природы всегда неповторимы, непохожи одно на другое. Но их неповторимость не мешает исследователям выделять при изучении Природы наиболее существенные характеристики предметов и явлений и устанавливать законы Природы — устойчивые связи между такими характеристиками.

С самых первых шагов развития науки ученые стремились свести законы Природы к совокупности законов взаимодействия и превращений небольшого набора элементарных частиц. Названия таких частиц менялись. Развитие физики кажется на первый взгляд (но только на первый!) состоящим из смены названий. На смену молекулам, атомам, электронам и ядрам, протонам и нейтронам приходят кварки, лептоны, глюоны... Ну и что? — спросит скептик. — Какие еще названия придумают физики?

Но дело не просто в смене названий. Новые понятия отражают фактическую смену уровней представлений о структуре материи, о свойствах ее составляющих.

Первый уровень, в сущности, был достигнут если не в Вавилоне и Древнем Египте, то во всяком случае в Древней Греции. Здесь мы не будем вдаваться в

---

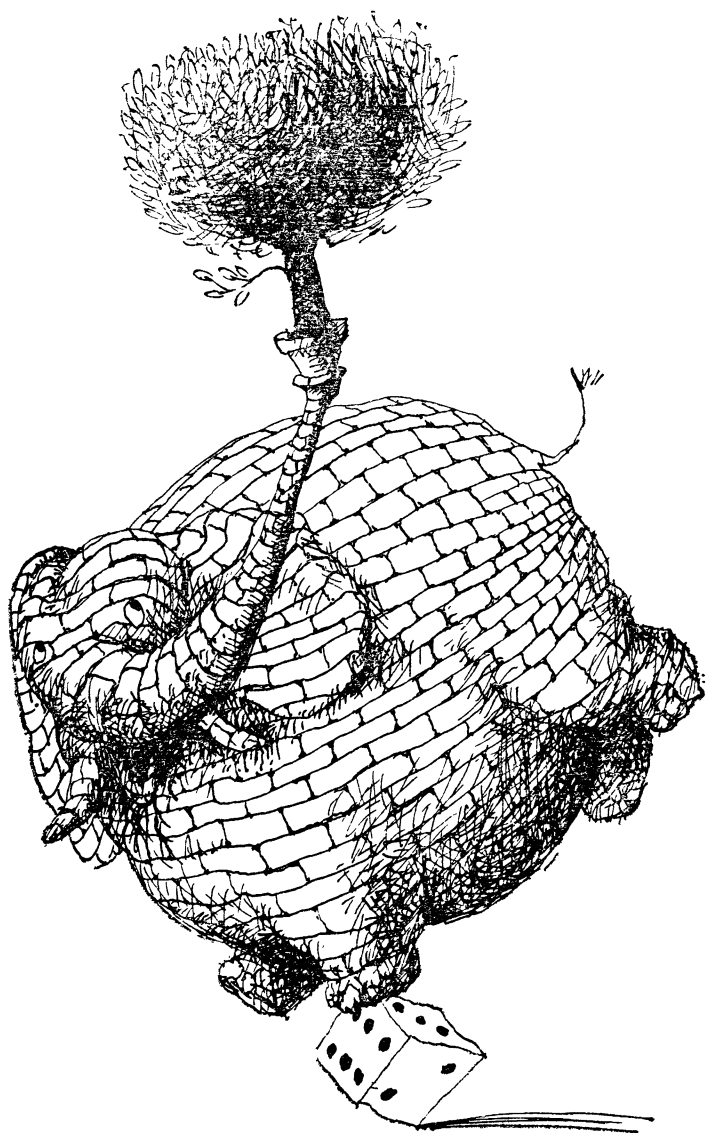
\*) Речь идет о книге А. Эйнштейна и Л. Инфельда «Эволюция физики».

детальную историю с указанием приоритетов, а постараемся пояснить общую картину.

Итак, можно представить себе определенный, не-большой набор сортов элементарных частиц. Все многообразие Природы, живой и неживой, определяется различным *расположением* этих частиц. Обладая ограниченным числом типоразмеров кирпичей, архитектор может построить огромное разнообразие сооружений — кирпичный забор, жилое здание, цирк или храм. К концу XIX в. этот «архитектурный» идеал реализуется в химии. Ограниченный набор химических элементов, т. е. определенное число (меньше 100) различных сортов атомов, позволяет химику «построить» огромное число разных соединений, т. е. различных молекул. Затем на разнообразие соединений с различной внутренней структурой накладывается различная укладка самих молекул в твердое тело, кристаллическое или аморфное, или в виде жидкости и т. д. Не будем здесь говорить о дальнейших возможностях придавать этим телам различную форму путем механической обработки, важен принцип. В основе научного мышления конца XIX в. лежала атомистика — представление об атомах — элементарных, не уничтожимых и не рождающихся вновь, а лишь подвергающихся перемещению, перекомбинированию в различные молекулы при химических превращениях.

Периодическая система Менделеева явилась генеральным обобщением всей суммы химических знаний. Общеизвестна роль периодической таблицы в предсказывании новых элементов, не известных во времена Менделеева. Сейчас, когда заполнены почти все пустые клетки таблицы, продолжается «погоня» за все более тяжелыми элементами. Ряд элементов, созданных Природой, заканчивался ураном. Нептуний, плутоний и следующие за ними — это рукотворные элементы, дети второй половины XX в. Однако, может быть, меньше осознана роль таблицы Менделеева в дальнейшем идейном развитии науки. Расставляя элементы по клеткам, автор таблицы исключает возможность существования каких-то промежуточных элементов. Не ясно, как далеко простирается таблица за ураном, но несомненно, что до урана включительно есть всего 92 элемента, не больше.





Еще важнее следующий аспект периодического закона: он наводит на мысль о неких принципах, общих для всех химических элементов, а отсюда уже недалеко до идеи, что все элементы построены по некоему общему плану из меньшего числа элементарных частиц.

Эта идея была реализована дважды, на двух различных уровнях. Сначала, в 20-х гг. XX в., была открыта и изучена электронная структура атома. Было выяснено, что атом состоит из ядра и электронных оболочек. Номер элемента в периодической системе оказывается равным заряду ядра и, следовательно, равным числу электронов в нейтральном атоме. На следующем этапе оказалось, что само ядро состоит из протонов и нейтронов. Были открыты изотопы.

Таким образом из наивных представлений древних о четырех элементах (вода, земля, огонь, воздух) через представления химиков о 92 (а потом и более) различных элементах наука пришла к представлению о трех сортах элементарных частиц — протонах, нейтронах, электронах. В огромной области науки (химия, биология, молекулярная физика) электроны и даже ядра можно и сегодня по-прежнему рассматривать как кирпичики, которые сохраняют свою индивидуальность, не рождаются и не уничтожаются. Все химические реакции, макрофизические процессы представляют собой перегруппировки этих частиц, вся ядерная физика представляет собой перегруппировку или взаимопревращение протонов и нейтронов.

Оказалось, что идею о кирпичах можно распространить и на все процессы естественной и искусственной радиоактивности. Стоило только объединить ядерные частицы — протон и нейтрон — в одном понятии «нуклон». Тогда даже такие ядерные процессы, в которых происходит превращение нейтронов в протоны, например,  $\beta$ -распад, также сводятся лишь к видоизменению неуничтожимого кирпичика — нуклона. Общее число нуклонов при этом сохраняется.

Конечно, к началу 30-х гг., когда были открыты нейтроны и строение ядра, кое-что уже изменилось в свете идей теории относительности. Итак, все электроны одинаковы, одинаков их заряд, то же относится и к протонам. Одинаковы по величине (но не по знаку) заряды протона и электрона, одинаковы и электро-нейтральны все нейтроны. Однако, говоря о массе ча-

стиц, о том, например, что одинаковы массы всех электронов, мы теперь должны говорить точнее — о массе покоя электрона. Именно ее в теории элементарных частиц и принято называть массой\*). Теория относительности показала, что масса — мера инертности и мера тяготения — есть в действительности полная энергия и не является инвариантной величиной. Так, учет дефекта массы за счет энергии связи делает массу связанной системы меньше суммы масс ее составляющих. Например, масса ядра гелия на 0,7 % меньше, чем сумма масс тех двух протонов и двух нейтронов, из которых состоит это ядро. Косвенный результат этого состоит в том, что, взвесив тело, мы еще не можем точно сказать, сколько нейтронов, протонов и электронов содержит данное тело. Зато связь между массой и энергией позволила на основе одних только измерений атомной массы определить энергию, которая выделяется при превращении водорода в гелий.

Итак, отметим как определенную ступень познания представление об элементарных частицах как о всегда одинаковых, не уничтожимых и не рождающихся, вечных составных частях всего сущего. (Забудем на время процессы бета-распада и взаимопревращение протонов и нейтронов. Радиоактивность была открыта в конце XIX в., но была понята только в XX в., так что мы вправе здесь не рассматривать эти процессы, излагая историю физики.) В пределах этого представления переход от атомов к протонам, нейтронам и электронам на качественном уровне ничего не меняет.

Принципиально новое слово было сказано в начале XX в., когда в результате открытий Планка и Эйнштейна выяснилось, что свет также состоит из отдельных частиц — фотонов. Если про электроны можно было думать, что они вечны, то с фотонами с самого начала была полная ясность: фотон и рождается, и уничтожается, потому что это частица света,

---

\*) В начале века было принято говорить о «массе движущегося тела», «зависящей от его скорости». Но эта формулировка сейчас полностью оставлена. Можно говорить об энергии тела или частицы, которая в данной системе координат равна  $E = mc^2 + mv^2/2$ , если  $v \ll c$ , и кинетическая энергия равна  $mv^2/2$ . Точное выражение энергии  $E = mc^2/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ . Очень подробно и четко этот вопрос разъяснен в книге Л. Б. Окуня « $\alpha\beta\gamma \dots Z$ » (М.: Наука, 1985. — Библиотечка «Квант»; Вып. 45. — С. 13—17).

которая может излучаться и поглощаться. Электрическая лампочка не «содержит» фотоны — она их рождает в процессе излучения. Возник новый тип частиц — рождающихся и уничтожающихся.

В одних опытах фотоны вели себя как волны — наблюдалась их дифракция и интерференция. На этом языке естественно говорить также и о генерации (испускании) волн и об их поглощении.

В других опытах фотоны рассеивались на атомах как механические шарики.

Наконец, фотоны могли появляться и исчезать, как шарики в руках иллюзиониста. Но, может быть, и другие частицы не всегда ведут себя как неуничтожимые механические шарики? Может, они также могут рождаться и уничтожаться? Может быть, и электрон ведет себя как волна, только длина этой волны столь мала, что нужны очень тонкие опыты, чтобы выяснить его волновую природу? Такие опыты были проделаны. Была наблюдена дифракция электрона. Возникла квантовая механика.

Квантовая механика 20-х гг., на основе которой можно было объяснить закономерности переходов в атомах, законы молекулярной химии и твердых тел, еще не изменила идею неуничтожимого электрона. Изменился только способ описания его движения. Однако одновременно был подготовлен математически и новый не менее радикальный шаг.

В 1931 г. последовательное квантовомеханическое описание движения электрона привело английского физика Дирака к предсказанию позитрона. У электрона оказался двойник с электрическим зарядом противоположного знака. В паре с этим двойником электрон мог рождаться и уничтожаться.

Итак, электрон не вечен. Он может рождаться и уничтожаться, но не поодиночке, как фотон, а в паре с позитроном. Электрон не может родиться или умереть один — он несет электрический заряд, который должен сохраниться. Если же, как в  $\beta$ -распаде, он образуется без позитрона, то и здесь он рождается в паре с протоном (нейтрон ядра превращается в протон). В  $\beta^+$ -распаде рождается позитрон, но одновременно с этим протон ядра превращается в нейтрон. Так что и в  $\beta$ -распадах электрический заряд сохраняется.

Были открыты и другие «заряды», сохраняющиеся в процессах превращения элементарных частиц. Так, в физику на смену понятия «вечная, неуничтожимая частица» приходит понятие «вечного, неуничтожимого заряда».

Двадцатый век самым решительным образом изменил наши представления о законах природы. Произошла настоящая научная революция! Новое понимание возникло не на пустом месте. К концу XIX и началу XX вв. физика достигла высокого уровня развития. К этому времени было завершено построение механики Ньютона, электродинамики Фарадея и Максвелла и термодинамики. Движение планет великолепно подтверждало законы механики. Электродинамика объяснила природу света, фундаментальные принципы электротехники. Появились электромоторы, динамомашинны, трансформаторы. Электродинамика предсказала существование более длинных по сравнению со световыми электромагнитных волн. Герц, Попов и Маркони создали на этой основе радиосвязь. Энергетика и транспорт, паровые турбины и двигатели внутреннего сгорания — все это достижения физики XIX в. Достижения, которые живы и сегодня.

Поэтому в научной революции XX в. с самого начала было ясно, что строить новый мир идей и знаний надо, бережно сохраняя все правильное, оправдавшее себя, что содержалось в «старой» физике.

Успеха в прокладывании новых путей добивались именно те физики, которые соединяли в себе два необходимых качества:

1) чувство нового: они видели новые данные опыта, требующие изменения устоявшихся взглядов, они не отмахивались от нового. Они активно искали пути объяснения новых фактов, не останавливаясь перед изменением устоявшихся теорий;

2) бережное уважение к наследию старого: эти физики понимали, что в физике XIX в. должно сохраниться все ценное, оправдавшее себя на опыте и в практике.

Так возникла новая физика, физика XX в., физика теории относительности и квантовой теории. Эта новая физика содержит новые революционные идеи и вместе с тем бережно сохраняет, включая в себя, прошлую физику XIX в.

Но и сам XX в. очень неоднороден, разные его периоды очень неодинаковы. Сейчас, когда век близится к окончанию, об этом уже можно делать определенные высказывания. Хорошо известно, что предсказания делать трудно, тогда как «послесказания» (если можно так выразиться) гораздо надежнее. Кратко об этом говорят «задним умом все крепки».

Квантовая теория была развита менее чем за 30 лет. В 1900 г. фундаментальная постоянная этой теории — постоянная Планка — введена в теорию теплового излучения. В 1905 г. показано, что в определенных процессах (фотоэффект, фотохимические реакции) свет ведет себя как совокупность отдельных частиц — фотонов. В 1912 г. построена первая модель атома, в которой еще на старом языке объяснены таинственные закономерности спектров. В 1924—1926 гг. рождается «настоящая» квантовая механика с принципом неопределенности. На очень важный вопрос: можно ли точно предсказать результат того или иного опыта — квантовая механика отвечает, что иногда ответ оказывается вероятностным. Еще 3—4 года, и последовательное применение квантовой теории дает полное описание двойственного характера электромагнитного излучения. Теория объясняет сочетание волновых свойств света и его квантовых свойств.

Теория предсказывает существование античастицы электрона — позитрона. Естественное обобщение приводит к понятию антивещества. Всего 30 лет — и как изменились и обогатились наши знания о полях и частицах. Но создание квантовой физики — это только половина научной революции. Второй половиной является создание теории относительности. Это произошло за еще более короткий срок — с 1905 по 1916 гг.

Название «теория относительности» не очень удачно. По существу, речь идет об изменении взглядов на пространство и время, на ту сцену, на которой разыгрываются все физические и нефизические явления. Веками казалось очевидным, что существует трехмерное пространство, в котором царствуют законы геометрии, установленные еще древними греками. Кроме того, есть время — один общий для всего и всех режиссер событий. Казалось очевидным, что расстояние между двумя телами в данный момент времени есть абсолютная величина, существующая независимо от

способа наблюдения. То же самое, казалось, относится к интервалу времени между двумя событиями.

Однако в 1905 г. появилась идея, что пространство и время связаны между собой. В 1916 г. ее развитие привело к представлению, что законы геометрии меняются около тяжелых тел и в этом состоит объяснение тяготения — объяснение движения планет и падения яблока на землю.

Современники открытия квантовой физики и теории относительности сознавали их глубину и принципиальную важность. Но большинство из них не могло предвидеть, как развитие физики приведет к открытию ядерной (как ранее говорили атомной) энергии — благословения и проклятия XX в., надежды и смертельной угрозы для потомков.

Вернемся к физике XX в., а точнее — к истории физики. Научная революция 1900—1930 гг. (ее можно назвать тридцатилетней войной против обывательского «здорового смысла») дала прочную основу для понимания природы. На этой основе появилась не только ядерная физика, но и физика твердого тела, и современная лазерная оптика, и много другого. Если смотреть шире, то надо причислить сюда и химию — квантовую химию, и молекулярную биологию, включая генетику. Если смотреть дальше — астрономия получила надежную основу, стали понятны источники энергии звезд. Новые представления о пространстве и времени привели к пониманию Вселенной как целого, к пониманию того, что Вселенная не остается неизменной, к пониманию того, как именно она меняется, какие стадии проходит в своей эволюции.

Развитие науки и после 1930 г. не шло гладко. Возникали трудности и противоречия. Сегодня, более чем через 50 лет, можно попытаться дать обобщенную картину драмы идей.

Творцы научной революции (А. Эйнштейн, Н. Бор, В. Гейзенберг, П. А. М. Дирак, ...) готовы были ее продолжать. Не остывшие от споров и дискуссий, утверждающих кванты и относительность, они готовы были к еще более радикальным поворотам. В этот период Бор говорит про некую не очень удачную работу «Эта теория недостаточно сумасшедшая, чтобы быть правильной». В этом высказывании — сгусток воспоминаний о том, как называли сумасшедшей

квантовую теорию, а Бор защищал ее и добился успеха.

Но в том и состоит изменение в науке, произошедшее после 1930 г.: призывы к «еще более сумасшедшим теориям» оказались неуместными, повисли в воздухе и отпали. Появилось новое поколение физиков-теоретиков. Называть имена тем труднее, чем ближе мы подходим к настоящему времени. Важно то, что это поколение многочисленно и в нем ни один отдельно взятый человек не занимает такого положения, какое занимал Эйнштейн в 1905—1920 гг. или Бор в 1916—1930 гг. Новое поколение после рубежа 1930 г. воспринимало квантовую теорию относительности не как собрание парадоксов и не как предмет дискуссий. Кванты и относительность для них — и для нас! — это солидные, проверенные и подтвержденные теории, это рабочие орудия. Вспоминаются слова поэта:

«Вперед, мой стих, мой верный вол,  
Неволей, если не охотой,  
Я близ тебя, мой кнут тяжел,  
Я сам тружусь, и ты работай».

(С. Кирсанов)

Физика за 50 лет, фундаментальная физика между 30-ми гг. и сегодняшним днем — это огромный коллективный труд ученых, огромные технические достижения, воплощенные в гигантских ускорителях, десятки и сотни тысяч экспериментальных и теоретических статей. Современная физика расширила и изменила набор элементарных частиц и полей. В 30-е гг. были известны только протоны, нейтроны, электроны и нейтрино (и их античастицы), электромагнитное и гравитационное поля. Сейчас мы уверенно говорим о 18 сортах кварков и 6 сортах лептонов, о 12 типах полей, подобных электромагнитному. Предположительное число элементарных частиц и полей — больше 100. Устанавливается сходство между различными частицами — физики более точно говорят о симметрии различных частиц. Однако без изменения остаются те самые общие принципы, которым подчиняется весь пестрый мир частиц: незыблемы квантовая теория и теория относительности.

Именно период после 1983 г. наиболее подходит для подведения итогов. В Европейском центре ядер-



ных исследований (ЦЕРН) в Женеве в 1983 г. были открыты частицы  $Z$  и  $W$  («зет» и «дубль-ве»). Это частицы нового типа, во многом отличающиеся от известных ранее частиц. Экспериментаторы сумели выделить из миллиарда различных событий рождения частиц несколько десятков событий образования  $Z$  и  $W$ . Это — триумф эксперимента. Однако самое замечательное в этом открытии состоит в том, что теоретики за несколько лет совершенно точно предсказали массу, заряд и другие свойства  $Z$  и  $W$ . Так что это триумф и теории. Эту теорию мы будем излагать ниже, пока отметим только, что речь идет о теории, принципиально основанной на квантах и относительности. Естественно, что те объекты, к которым прилагаются квантовые законы, неузнаваемо усложнились по сравнению с 1925 или 1930 гг.

Впереди видны дальнейшие задачи, которые можно и нужно решать на основе квантовой теории и теории относительности.

Означает ли это, что физика вступила в некий заключительный период количественного накопления фактов и теорий без дальнейшего качественного изменения основ? Нет, такой огорчительный вывод был бы неправилен. Пятидесятилетняя «передышка» в смене принципов (заполненная, однако, огромным трудом), вероятно, окончится вместе с окончанием XX в., а может быть, и раньше.

Любопытно, что к предсказанию этой грядущей научной революции «приложил руку» Планк в 1900 г. Мы уже упоминали, что он ввел понятие кванта, как определенного количества энергии, испускаемого при излучении. Он связал это количество с частотой света (числом колебаний в одну секунду) формулой  $E = h\nu$ .

Так как энергия и частота имеют различную размерность, т. е. измеряются в различных единицах, то коэффициент пропорциональности  $h$ , так называемая постоянная Планка, имеет определенную размерность:  $h = 6,63 \cdot 10^{-27} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}^*$ ). Планк сразу понял, что  $h$

---

\*) В физике удобно пользоваться круговой частотой  $\omega$ . Представим себе равномерно вращающееся тело. Предположим, что оно делает один оборот за  $T$  секунд. Значит, за каждую секунду тело совершает  $\nu$  оборотов, где  $\nu = 1/T$ . Если на теле в одном месте ставится метка, то эта метка будет появляться перед нашими глазами с частотой  $\nu$ , т. е.  $\nu$  раз в секунду. С другой стороны, можно ввести угловую скорость вращения

есть мировая постоянная,  $\hbar$  имеет одно и то же значение всегда и везде. Величина  $\hbar = h/2\pi$  с 1899 г. занимает в физике такое же положение, как и скорость света  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/с, как и гравитационная постоянная  $G = 6,7 \cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/(с<sup>2</sup>·г). Три величины,  $G$ ,  $c$  и  $\hbar$ , выражаются через три выбранные человеком для его удобства единицы — грамм, сантиметр, секунду. Можно выбрать естественные единицы массы, длины и времени, выражающиеся через  $G$ ,  $c$  и  $\hbar$ . Тогда единица массы равна  $(\hbar c/G)^{1/2} = 2 \cdot 10^{-5}$  г, единица длины  $\hbar^{1/2} G^{1/2} c^{-3/2} = 1,5 \cdot 10^{-33}$  см и единица времени  $\hbar^{1/2} G^{1/2} c^{-5/2} = 5 \cdot 10^{-44}$  с. Эти единицы называются *планковскими*. Они характеризуют масштабы, в которых гравитация объединяется с квантовой физикой. Обратите внимание на единицу массы. Эта величина гигантски больше массы протона (в  $10^{19}$ , т. е. в миллиарды миллиардов раз). Долгое время казалось, что такое различие означает, что планковская масса не имеет отношения к миру элементарных частиц.

То же относится и к роли тяготения. Из-за того, что всемирное тяготение действует на все частицы, что нет антигравитации, гравитация отдельных частиц складывается. И в больших масштабах, благодаря коллективности действия гравитации, именно она определяет движение макроскопических тел.

Роль гравитации наиболее существенна при больших плотностях (черные дыры) или в очень больших масштабах. Без гравитации невозможно понять ни закономерности движения и эволюции звезд, галактик, их скоплений и сверхскоплений, ни закономерности эволюции Вселенной в целом.

Но для отдельных частиц ситуация иная. Например, электрическое притяжение электрона к протону,

---

тела, выраженную как число радиан (радиан — единица угла, равная  $\sim 57$  градусам), на которое поворачивается тело за одну секунду. Удобство введения  $\omega$  состоит в том, что линейная скорость движения каждой точки тела равна  $v = \omega r$ , где  $r$  — расстояние от оси вращения. В этой формуле нет никакого числового множителя. Если ось вращения совпадает с осью координат  $Z$ , то координаты точки, находящейся на единичном расстоянии от оси, равны:  $x = \cos \omega t$ ,  $y = \sin \omega t$ . Легко найти связь  $\omega$  и  $v$ . Полный оборот соответствует повороту на  $2\pi$  радиан. Значит,  $T = 2\pi/\omega$ ,  $v = \omega/2\pi$ . Величину  $\omega$  принято называть круговой частотой. Если мы хотим связать энергию фотона с его круговой частотой, то получим  $E = \hbar\omega$ , где  $\hbar = h/2\pi$ . В настоящее время физики практически всегда пользуются именно величиной  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27}$  г·см<sup>2</sup>/с.

в атоме водорода в огромное число раз (в  $10^{40}$  раз) превышает силы всемирного тяготения в том же атоме. Как вывод — сравните со сказанным до этого — тяготение не играет роли в атомах, ядерных и «элементарно-частичных» (громоздкое, но точное прилагательное) процессах. Однако уже  $Z$  и  $W$  почти в 200 000 раз тяжелее электрона и в 100 раз тяжелее протона. Но и эти массы все еще очень малы по сравнению с планковской массой. И для взаимодействия  $Z$ - и  $W$ -частиц всемирное тяготение также не играет роли. В своих построениях на бумаге теоретики опережают экспериментаторов, уходят в недостижимую никакими ускорителями область энергий и говорят о частицах все более тяжелых, с массой, приближающейся к планковской массе. Вот здесь и понадобится, по-видимому, дальнейшее принципиальное развитие основ теории.

Почему именно планковская масса может сыграть роль рубежа? Дело в том, что она получена из сочетания постоянной тяготения и постоянной Планка (вместе со скоростью света). Но по теории относительности тяготение связано с изменением самого пространства и времени. Это изменение придется рассматривать в рамках квантовой теории.

До сих пор пространство и время были ареной физических (в частности, квантовых) процессов. При планковской массе частиц на соответствующих длинах и интервалах времени в самом пространстве и времени появятся квантовые свойства. Вступит в действие принцип неопределенности, необходимо будет вероятностное рассмотрение самих пространства и времени, их структуры.

Лабораторная физика очень далека от тех условий, когда могут осуществляться эти новые явления. Ей доступен только далекий низкоэнергетический предел теории таких явлений. Однако в космологии мы уже сейчас пытаемся анализировать процессы в «планковских» условиях. Сегодня таких процессов нет, но они могли иметь место на самой ранней стадии эволюции Вселенной. Тогда можно искать следы этих процессов в сегодняшнем мире так, как ищут окаменевшие скелеты и отпечатки древних вымерших животных и растений. Сегодня «физика на марше» — перед физикой стоят реальные ближайшие задачи, в том числе и задачи, прямо связанные с научно-техническим

прогрессом (чего мы здесь не касались). Физика имеет и стратегические далекие цели, в числе которых и развитие физики XX в. до ее логических пределов и создание будущей физики XXI в.

В нашем изложении драмы физических идей мы иногда пользуемся математическими понятиями вектора, производной и т. д. Эти понятия (излагаемые и в современных учебниках средней школы) позволяют более точно раскрыть суть некоторых проблем. Для удобства читателя, не имеющего под рукой школьных учебников, или для школьника, желающего получить представление и о математической стороне проблемы, в конце книги имеется математическое дополнение, позволяющее получить некоторое интуитивное представление об этих математических понятиях. Впрочем, основные сюжетные ходы драмы познания природы будут, мы надеемся, понятны и без этого.

Цель книги — именно показ драмы идей. Это история, но история крупными мазками, без точных дат и забытых героев, оказавшихся (часто несправедливо) в стороне от основных событий. Есть много книг по истории физики, уделяющих основное внимание приоритетным вопросам. Высшее счастье для автора такой книги — обнаружить какое-то указание, теорему, точку зрения в возможно более ранней работе. Такая находка действительно очень много говорит об авторе указания или теоремы, говорит о его прозорливости и таланте, о том, насколько далеко он ушел вперед по сравнению со своими современниками.

Однако в скрупулезно-точных книгах такого рода обычно умалчивается другая сторона дела. Ушедший слишком далеко вперед часто отрывается от современной науки и практически не оказывает влияния на современников и на общий, поступательный ход развития науки. Можно привести несколько очень характерных примеров.

1) Ньютон придерживался корпускулярной теории света, которая затем была как будто опровергнута. Поэтому вполне справедливо теория квантов (кусочков) света приписывается Планку и Эйнштейну, а не Ньютону.

2) Петр Леонидович Капица в юбилейном докладе справедливо отмечает огромные достижения Ломоносова. Вместе с тем, с естественной горечью, Капица отмечает, что работы Ломоносова оставались долгое

время неизвестными на Западе (отчасти потому, что после годов учения в Германии он не выезжал за границу) и не оказали влияния на общий ход развития науки.

3) После открытия и правильного истолкования излучения Вавилова — Черенкова, в старых фолиантах Хевисайда и Зоммерфельда были найдены расчеты излучения электрона, движущегося со сверхсветовой скоростью. Однако создали теорию этого излучения для реальных условий релятивистского электрона в жидкости именно И. М. Франк и И. Е. Тамм, и они вместе с П. А. Черенковым заслуженно получили Нобелевскую премию.

Между тем наша книга посвящена именно драме идей, посвящена развитию физики как целого. Смена основных направлений и общих убеждений (именно общих, т. е. большинства естествоиспытателей, особенно физиков, а не отдельных провидцев или невежд) — вот тема нашей книги. Это освобождает нас от кропотливых исторических изысканий. Однако такое намерение возлагает на нас гораздо более трудную задачу. Излагая общий ход идей, мы стараемся показать его логику, глубокие и неслучайные причины общих убеждений.

Таким образом, наша книга посвящена немногим, очень общим и принципиально важным проблемам в их историческом развитии.

Прежде всего это *атомизм*, идея построения всей многокрасочной картины мира из минимального набора строго одинаковых составных частей.

За этим следует *классическая теория поля*. Уже на уровне этой теории появляется важнейшее понятие заряда. Сперва речь идет об электрическом заряде, потом это понятие обогащается. Лишь после классической теории поля вводятся понятия *квантовой теории*. Наше глубокое убеждение состоит в том, что прямой переход к современной квантовой теории поля, игнорирующий классическую теорию, нецелесообразен. Он может экономить время молодого теоретика, стремящегося возможно скорее начать самостоятельные расчеты. Однако для нашего читателя, как мы его представляем себе, читателя, интересующегося драмой идей, — такой подход не годится. Только после изложения атомизма и классической теории поля

вводятся понятия квантовой физики. Они изменяют лицо атомизма.

Обычно подчеркивают принцип неопределенности и вероятностный характер квантовой теории. Но в атомной и ядерной физике на первый план выдвигаются другие особенности квантовой теории. Атом водорода имеет одно вполне определенное основное состояние; все атомы водорода в этом состоянии строго одинаковы. В этой тождественности всех квантовых систем данного типа, атома в данном состоянии, налицо резкое отличие от классических систем — планет, вращающихся вокруг Солнца.

Применяя квантовую теорию к электромагнитному полю, мы приходим к понятию *фотона* — частицы, которая рождается при излучении и исчезает при поглощении света.

Понятие элементарной частицы в XX в. претерпевает радикальное изменение. В древности и вплоть до XIX в. включительно неуничтожаемость и вечное существование были важнейшими свойствами частиц. В XX в. элементарные, т. е. простейшие, частицы могут рождаться, исчезать, превращаться одни в другие. В значительной мере те свойства, которые мы ранее приписывали частицам, теперь имеют заряды — определенные количественные характеристики частиц.

Далее развивается *теория слабого взаимодействия* — радиоактивности, связанной с излучением электронов, той самой, от которой зависит опасность ядерной (атомной) энергии. В очень упрощенной форме излагается связь, или, как принято говорить, *объединение* электромагнитного и слабого взаимодействия. Наконец, рассматривается структура и составные части протона и нейтрона, которые до недавнего времени считались образцами элементарных частиц. По причинам, разъясненным далее в тексте, эта теория имеет причудливое название «*квантовая хромодинамика*». Оба вопроса — слабое взаимодействие и хромодинамика — гораздо более подробно и на более высоком (но и более трудном) уровне обсуждаются в замечательной книге Л. Б. Окуня « $\alpha\beta\gamma \dots Z$ ».

Последняя часть книги посвящена краткому изложению идей *современной теории гравитации* — общей теории относительности и современных теоретических подходов к единому описанию всех фундаментальных сил природы. Это рассказ о тенденциях фундамен-

тальных исследований сегодняшнего дня, об идеях, бурно обсуждающихся в современных научных журналах. А такой рассказ в контексте нашего повествования с необходимостью обретает краткость газетного репортажа.

В основном тексте книги мы по возможности старались обходиться без формул и, в крайнем случае, писали простые алгебраические соотношения вроде  $E = \hbar\omega$ . Точная формулировка законов природы и, в частности, теория поля требует по крайней мере дифференциального и интегрального исчислений, в том числе для функций трех пространственных переменных и времени. Необходимые математические сведения кратко даны в Математическом дополнении, которое никак не может служить заменой учебникам и рассматривается нами как словарь, дающий некоторые представления об этих математических понятиях, приводятся точные формулировки законов электромагнитного поля и распространения электромагнитных волн.

..... Жена  
магнетизировать начнет  
и счастлив муж, коли заснет.

*М. Лермонтов*

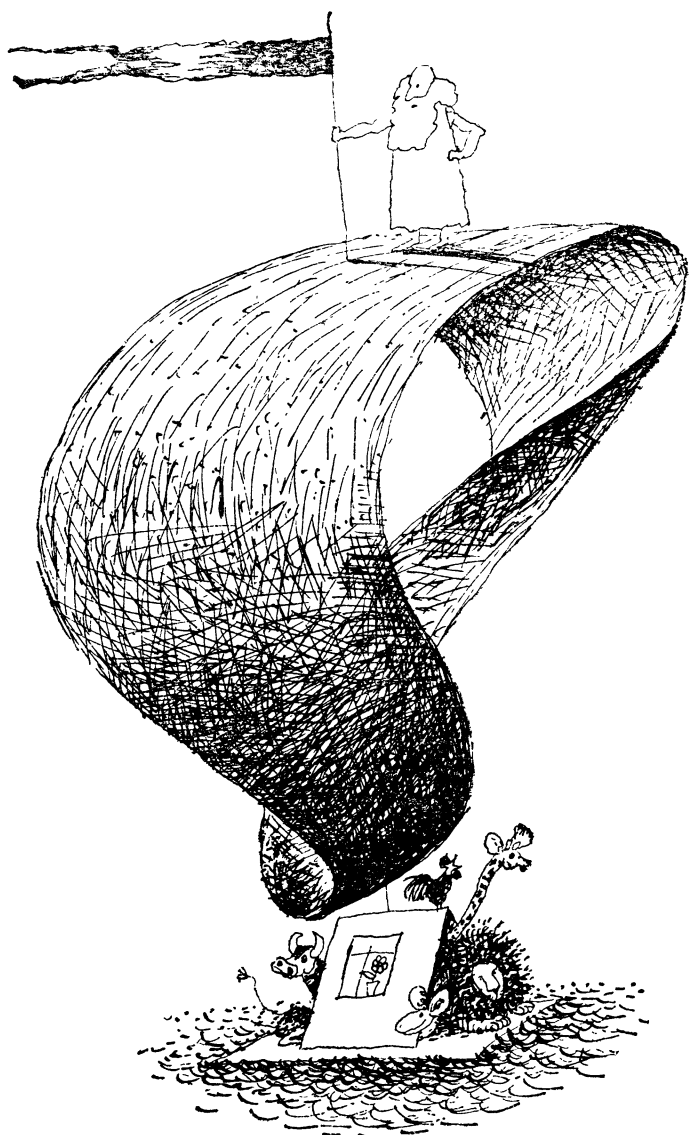
### Элементарность и неделимость

Что значит быть элементарным? Это значит быть простым, настолько простым, что проще некуда. То есть это заведомо значит не быть сложным, сложенным из чего-то еще. Элементарная частица не может быть составной, не может слагаться из других компонент. Значит, ее и разделить ни на что нельзя. Мы вроде бы имеем тождество элементарности и неделимости.

Итак, элементарная частица есть предел делимости материи. Да существует ли такой предел? Древнегреческие мыслители впервые в истории человечества серьезно поставили этот вопрос. Не имея возможности вооружить глаз микроскопом, они вооружились рассуждениями. Ломая палку, мы должны получать палочки. Если на каком-то этапе деления мы получим не палочку, а что-то еще, то как же тогда «не палочки» складываются в палку? «Если я разломаю палку или что-нибудь другое, а потом сложу, то снова получится то же самое, равное себе и единое. И очевидно, что дело обстоит именно так, в какой бы точке я ни ломал палку. Значит... она делима повсюду. Так что же остается в ней, помимо деления? Даже если останется какое-то свойство, то каким образом палка раскладывается на эти точки и свойства и составляется из них? Или как они отделяются от нее? Поэтому если величины не могут состоять из соприкасаний и точек, то необходимо должны существовать неделимые тела и величины», — писал Аристотель в своем трактате «О возникновении и уничтожении».

Итак, еще древние греки, задавая вопрос о мельчайших составляющих материи, фактически ставили





вопрос об элементарных носителях свойств объектов, о сохраняющихся величинах.

Представление о вечной неизменности форм окружающей Природы вело к представлению о неизменности мельчайших ее составляющих. Казалось очевидным, что если составляющие вещества изменяются, должно было измениться и само вещество. Нестабильность составляющих делала бы нестабильным и составленные из них предметы.

«...Первоначально должно быть присуще

бессмертное тело,

Чтобы все вещи могли при кончине на них

разлагаться

И не иссяк бы запас вещества для вещей

возрождения...» —

писал Лукреций в своей поэме «О природе вещей».

В рассуждениях древнегреческих мыслителей возникали парадоксы дискретного и непрерывного, конечного и бесконечного, движения и покоя. Эти парадоксы в той или иной мере возникают во всех теориях строения материи.

### Электрический заряд

Еще в древности было известно, что если потереть кусок янтаря, он способен притягивать мелкие предметы. Этот забавный факт терялся в ряду многообразия явлений природы, с которыми сталкивались мыслители древности. В конце XVI в. У. Гильберт установил, что свойством притягивать мелкие предметы обладают и многие другие вещества. В середине XVII в. возник термин «электричество», а в XVIII в. было обнаружено существование двух видов наэлектризованных тел. Два тела одного и того же типа между собой отталкивались, два тела разных типов — притягивались. Забавный факт притяжения соломинок превратился в исследованиях Б. Франклина в явление в буквальном смысле грозное. Эффектные опыты с разрядами от электрических машин и грозные молнии оказались явлениями одной природы. Как объяснить эти явления? Подход Франклина был весьма прагматичен. «Для нас наиболее важным является не знание способа, которым природа осуществляет свои законы, достаточно знать сами эти законы. Реальную пользу представляет знание того,

что если отпустить в воздухе ничем не поддерживаемое фарфоровое изделие, то оно упадет и неминуемо разобьется. Знать же, как оно упадет и почему разобьется — это уже чисто умозрительный вопрос. Приятно, конечно, знать истину, однако обеспечить целостность фарфорового изделия мы можем и без этого.»

Каковы же законы электрических сил? Франклин наблюдал странное явление. Зарядив металлическую полую сферу, он подносил к ее внутренней поверхности металлический шарик, и шарик оставался незаряженным. Заряженный же шарик, помещенный внутрь заряженной сферы, не испытывал действия заряда сферы. Пристли, с которым Франклин поделился своим недоумением по поводу этих странных явлений, высказал догадку, что, может быть, дело в том, что электрическая сила обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами — в полной аналогии с широко известным в ту пору законом всемирного тяготения Ньютона. Но в законе Ньютона тяготение двух тел определяется количеством вещества, которое в них содержится. Это количество именовалось массой тел, так что сила тяготения двух тел оказывалась пропорциональной произведению этих масс. В случае электрических тел электрическое взаимодействие тем больше, чем больше мы их заряжаем. Можно поэтому ожидать, что электрическая сила определяется количеством электричества, содержащимся в электрически заряженных телах — их электрическим зарядом. Ш. Кулону удалось измерить силу электрического взаимодействия. Она действительно оказалась обратно пропорциональной квадрату расстояния между зарядами. Зависимость силы от произведения зарядов Кулон фактически постулировал. Он предположил, что сила пропорциональна произведению зарядов тел. Для силы  $F_e$  взаимодействия двух зарядов  $e_1$  и  $e_2$  на расстоянии  $r$  получался закон

$$F_e \sim \frac{e_1 e_2}{r^2},$$

аналогичный закону всемирного тяготения Ньютона

$$F_g \sim \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Такой закон позволял правильно количественно объяснить все наблюдавшиеся электрические явления.

Тяготение определялось массой тела. Если тело состоит из частиц, то масса определяется полным числом этих частиц. А заряд? По-видимому, заряжая тело, мы привносим какие-то частицы электричества — их число определяет величину заряда тела. Есть два типа электрически заряженных тел: положительно и отрицательно заряженные. По-видимому, должны быть частицы положительного и отрицательного электричества, и если их в теле поровну — тело не заряжено. Если частиц одного типа больше, а других — меньше, тело обладает электрическим зарядом. Каких частиц больше, таков и знак заряда тела. Естественно предположить, что частицы неуничтожимы — они переходят от одного тела к другому: от меха к эбонитовой палочке, от беличьей шкурки — к стеклянному шарiku. Заряженное тело теряет свой заряд со временем — оно разряжается. Избыточные частицы электричества стекают с него, или на него натекают частицы, компенсирующие избыточный заряд, происходит электрическое зарядение или же электрический разряд — проходит электрический ток. Электрический разряд в атмосфере — явление бурное. Сверкает молния, грохочет гром. А вызывает это яркое и шумное событие «темный лидер» — невидимый поток электрических частиц, прокладывающих себе извилистый путь от заряженной тучи к поверхности Земли. Так сворачивает камни ручей с прозрачной водой. Интуитивное представление об электрических частицах позволяло исследователям электричества выявить двоякую роль электрического заряда. Электрический заряд — мера электрического воздействия. Электрический заряд — мера количества электричества. Оба свойства оказываются связанными. Мы скоро это увидим.

### **Электрический ток и магнитные явления**

Электрический разряд — в буквальном смысле слова яркий пример стекания заряда, пример электрического тока. Но в нашей обыденной жизни мы встречаем бурное грозное электричество значительно реже тихого невидимого электричества в проводах, приносящего нам свет электрических лампочек, голоса друзей в телефоне, мировые события в телевизоре. Электрический ток в проводах более близок нам, именно он скорее всего приходит на ум, когда

речь заходит об электрическом токе. Но в физику мирный ток проводов пришел значительно позже тока электрического разряда. Первые опыты по изучению тока проводились с разрядами. Изучая разряды молнии или лейденской банки — прообраза современного конденсатора, Франклин и Беккариа наблюдали магнитное действие электрического тока. Это вновь возродило старый вопрос о связи электрических и магнитных явлений.

Вопрос об этой связи уходит в глубокую древность. Для древних вопроса, в сущности, не было. Они считали очевидным, что притяжение намагниченных кусков железа и притяжение наэлектризованных кусков янтаря — явления одной природы. О полном тождестве речь, видимо, не шла, но симметрия электричества и магнетизма сомнения не вызывала. Поэтому первым исследователям электрических явлений, например, Гильберту, приходилось специально подчеркивать отличие электричества от магнетизма. Предрассудком называл Гильберт представление о симметрии электрических и магнитных свойств. К этому времени (к середине XVII в.) симметрии действительно не было. Природа молний была неизвестна. Электричество казалось забавной безделицей. Иное дело магнетизм. Еще в незапамятные времена неизвестным восточным умельцем, подобным неизвестному изобретателю колеса, было найдено применение отклонению магнита под действием земного магнетизма — был изобретен компас. По существу, было открыто магнитное поле Земли. Всепроникающая магнитная сила, заставляющая стрелку держаться строго определенного направления, завораживает каждого при первом знакомстве с компасом.

«То, что эта стрелка вела себя так определенно, никак не подходило к тому роду явлений, которые могли найти себе место в моем неосознанном мире понятий (действие через прикосновение). Я помню еще и сейчас — или мне кажется, что я помню, — что этот случай произвел на меня глубокое и длительное впечатление. За вещами должно быть что-то еще, глубоко скрытое», — писал А. Эйнштейн в своих «Автобиографических заметках» о том ощущении чуда, которое он испытал ребенком 4—5 лет, когда отец показал ему компас.

Итак, симметрии не было — с одной стороны, многовековой опыт практических приложений магнетизма, с другой — забавное свойство янтаря. Но прошел век, и в 1758 г. в «Письмах к Беккари» Беккариа описывает результаты своих повторений опытов Франклина по исследованию электрических разрядов и задается вопросом: «не обуславливает ли электрический флюид неким универсальным неощутимым непрерывным периодически циркулирующим движением... во всех случаях возникновение и поддержание магнитных свойств». Вопрос вызвал восхищение английского естествоиспытателя Пристли: «Это действительно гениальная мысль, и если она верна, она в высшей степени упрощает наши представления о законах природы». Связь электричества и магнетизма восстанавливалась. Казалось, восстанавливалась и симметрия электрических и магнитных свойств.

У магнита два полюса — северный и южный. И электрических зарядов два типа — положительные и отрицательные. Одноименные электрические заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются. И у двух магнитов — одноименные полюса отталкиваются и разноименные притягиваются. Экспериментальные методы, развитые Кулоном, позволили ему измерить силу взаимодействия двух магнитов. Разноименные полюса магнитов притягиваются, а одноименные отталкиваются по такому же закону, что и электрические заряды — обратно пропорционально квадрату расстояния. Как и в случае силы электрического взаимодействия двух зарядов, Кулон постулировал, что магнитная сила пропорциональна произведению магнитных зарядов полюсов. Между электрическим зарядом и «магнитным зарядом» полюса магнита имелись одно отличие. При электризации тела мы получаем изолированный электрический заряд определенного знака. Намагничивая тело, мы получаем сразу два полюса магнита. В результате намагничивания нельзя получить изолированный магнитный полюс. Намагниченное тело не может обладать изолированным магнитным зарядом определенного знака. Но различия не смущали. Слишком сильна была традиция механики Ньютона. Казалось естественным, что между двумя малыми телами все силы, независимо от их природы, действуют единообразно — по прямой, соединяющей тела. И с расстоянием все силы убы-

вают одинаково — обратно пропорционально квадрату расстояния между телами. Привлекало изящное единое описание всех дальнодействий — гравитационного, электрического, магнитного. Тогда различие сил проявлялось бы только в разных мерах их воздействия: гравитационная сила пропорциональна произведению

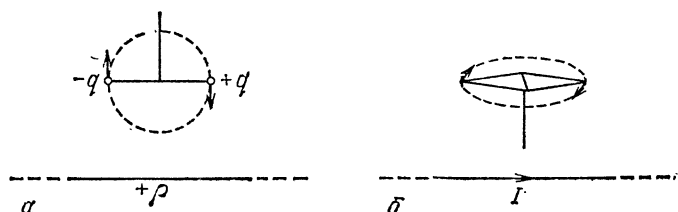


Рис. 1. Магнитная игла (магнитный диполь) и электрический диполь поворачиваются по-разному. Электрический диполь (а) поворачивается в плоскости однородно заряженной проволоки. Магнитная игла (б) поворачивается перпендикулярно плоскости провода с током

масс тел, электрическая — электрических зарядов, магнитная — магнитных зарядов.

В начале XIX в. благодаря изобретению А. Вольта электрической батареи стало возможным изучать действие постоянного тока. Вместо кратковременных токов электрического разряда в лабораториях появился непрерывный электрический ток в проводах, соединяющих полюса батареи. Целых двадцать лет, имея в своем распоряжении непрерывный ток, физики искали магнитную силу тока. Силу, действующую в плоскости магнита и тока. И не нашли. А в 1820 г. появилась статья датского физика Х. К. Эрстеда. Всего четыре страницы латинского текста. Эрстед наблюдал отклонение магнитной иглы под действием постоянного тока прямого провода. Ведь магнитная стрелка ориентируется по земному меридиану, указывая одним концом на северный полюс Земли, а другим — на южный. Так вот, ток, параллельный меридиану, отклонял стрелку компаса от направления меридиана. Сила действовала не вдоль прямой, соединяющей провод и магнит, а поперек. Магнитная сила тока была найдена. Она оказалась не отталкивающей, а «поворачивающей».

Электрическая сила, действующая на электрический диполь (гантельку с равными по величине и про-

тивоположными по знаку электрическими зарядами на концах), — тоже поворачивающая. Но магнитная сила тока, действовавшая на магнит, поворачивала его не так, как поворачивала бы электрический диполь электрическая сила однородно заряженной проволоки (рис. 1). Магнитная сила тока поворачивала магнит «поперек».

Ньютоновское описание действия на расстоянии дало первую трещину. Нарушалось единообразие такого описания. Пройдет еще немного времени, и сама идея действия на расстоянии будет отвергнута в работах Фарадея и Максвелла. Потребуется еще сто лет, чтобы и идея о гравитационном действии на расстоянии перестала быть верной.

### Напряженность и потенциал

Закон Кулона определил силу взаимодействия зарядов. Но *как* они осуществляют свое взаимодействие? Можно было бы просто сказать, что два заряда действуют друг на друга на расстоянии по закону Кулона и не вдаваться в размышления о том, какие невидимые нити соединяют заряды, какие невидимые пружины притягивают разноименные заряды и расталкивают одноименные. Так поступил в свое время Ньютон, изучая тяготение: «Причину этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю... Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря».

Но (даже не задаваясь вопросом о природе электрических сил) чтобы упростить расчет силы взаимодействия неточечных заряженных тел, оказалось удобным, чисто формально, ввести некоторую характеристику окружающего заряд пространства — *напряженность*  $E$  — силу, с которой рассматриваемый заряд подействовал бы на малый заряд, помещенный в данную точку, и отнесенную к величине этого малого заряда. Если же мы поместим в эту точку заряд  $q$ , то на него подействует сила  $F = qE$ . Обратите внимание на то, что буквы  $F$  и  $E$  в этой формуле написаны более жирно, чем другие буквы. Это означает, что, так же как и сила, напряженность электрического поля — век-



тор. Она характеризуется не только величиной, но и направлением. Она, вообще говоря, меняется от точки к точке и по абсолютной величине, и по направлению. (Подробнее о том, что такое вектор, см. в конце книги Математическое дополнение, с. 179.)

Каждая точка пространства, окружающего данный заряд, заряженное тело или систему заряженных тел, характеризуется не только электрической напряженностью — отношением электрической силы, действующей на малый заряд, помещенный в данную точку, к величине этого малого заряда. С каждой точкой связана еще одна характеристика — *электрический потенциал* — потенциальная энергия взаимодействия пробного малого заряда, помещенного в эту точку (отнесенную к величине пробного заряда), с данным источником электрической силы (точечным зарядом, заряженным телом или системой заряженных тел). При перемещении пробного единичного заряда из одной точки в другую электрическая сила совершает работу, численно *равную разности электрических потенциалов двух точек*. Если мы выберем значение потенциала в какой-то точке пространства за начало отсчета потенциала, то определяя работу электрической силы при перемещении единичного заряда из этой точки в любую другую точку, мы можем однозначно определить потенциал любой точки пространства. Мы можем, например, выбрать бесконечно удаленную точку за начало отсчета потенциала и (это наиболее естественно) положить потенциал в ней равным нулю. Работа электрической силы при перемещении из бесконечно удаленной точки пробного единичного заряда в данную точку, удаленную на расстояние  $r$  от точечного заряда  $Q$ , составит

$$A = \frac{Q}{r}.$$

С другой стороны, эта работа равна разности потенциалов начальной и конечной точки перемещения. Мы положили потенциал начальной (бесконечно удаленной) точки равным нулю. Тогда потенциал конечной точки оказывается равным величине совершаемой работы  $A$ :

$$\varphi(r) = A = \frac{Q}{r}.$$

В определении потенциала есть элемент произвола. Ведь мы не проводили расчет потенциала бесконечно удаленной точки. Мы просто положили его равным нулю. Если бы мы положили его равным не нулю, а какой-то величине  $\varphi_\infty$ , то и потенциал всех остальных точек пространства, окружающего точечный заряд, был бы равен не  $Q/r$ , а

$$\varphi = \frac{Q}{r} + \varphi_\infty.$$

Получается, что потенциал определен неоднозначно, он определен с точностью до выбора потенциала в точке начала отсчета (в нашем примере — в бесконечно удаленной точке), а эту величину мы можем выбрать какой хотим, — от ее значения работа электрической силы не зависит. Мы впервые подошли к тому, с чем мы будем в самых разных аспектах сталкиваться на всем протяжении этой книги — к неизменности физических следствий при изменении определения числового значения той или иной физической величины (при ее преобразовании).

В физике наряду с измеримыми величинами есть величины очень удобные, но прямо не измеримые. Эти величины можно менять (преобразовывать) так, что при этом физические следствия не меняются. Например, значения координат точки  $x$ ,  $y$ ,  $z$  зависят от выбора начала координат, зависят от того, как направлены оси координат. А вот непосредственно измеряемое расстояние между двумя точками ни от выбора начала координат, ни от направления осей координат, конечно, не зависит. Такой же удобной, как координата, но зависящей от выбора начала отсчета величиной является электрический потенциал.

Итак, есть две характеристики пространства, окружающего заряженное тело. Они говорят о том, что произойдет, если мы поместим пробный заряд в данную точку пространства. Одна — электрическая напряженность — говорит об электрической силе, которая будет действовать на пробный заряд в различных точках пространства вблизи данного заряженного тела. Другая — электрический потенциал — говорит о потенциальной энергии, которой будет обладать такой заряд в этой точке.

Обе характеристики связаны друг с другом. Математическое описание свойств электрической силы при-

водит к некоторому удобному приему — расчет электрической силы, действующей на данный заряд, упрощается, если предположить, что источник электрической силы действует на данный заряд не непосредственно на расстоянии, но каким-то образом преобразует окружающее его пространство. Оказывается удобным приписать действие данного заряда на другие заряды особому состоянию пространства, окружающего данный заряд, — его *электрическому полю*. Электрический потенциал, характеризующийся только своим числовым значением и не имеющий направления в пространстве, является скалярной характеристикой этого поля. Электрическая напряженность является его векторной характеристикой.

Как мы скоро убедимся, электрическое поле не просто удобный математический прием, а физическая реальность. Здесь же заметим, что, казалось бы, электрический потенциал — более удобная величина (просто число). Значительно проще связать с каждой точкой одно число (электрический потенциал), чем задавать в каждой точке вектор электрической напряженности, т. е. три числа (три составляющих этого вектора). Но, во-первых, электрический потенциал определен неоднозначно — с точностью до постоянной. А во-вторых, оказывается, существуют такие электрические поля, для которых можно определить электрическую напряженность, а электрический потенциал определить нельзя. Такие поля появляются, если от *электростатики* — науки о взаимодействии покоящихся зарядов — перейти к *электродинамике* — науке, рассматривающей заряды движущиеся. Электрическое поле неподвижного заряда потенциально — можно ввести его электростатический потенциал. Казалось бы, если заряд движется, то такой потенциал будет просто меняться со временем в соответствии со смещением заряда. Но движущийся заряд — это электрический ток, а электрический ток обладает и магнитным воздействием. А это, как увидим в следующем пункте, может приводить и к электрическому воздействию. И такое воздействие будет уже непотенциальным.

Описание магнитных свойств тоже упрощается, если чисто формально приписать и магнитному воздействию особое состояние пространства, осуществляющее это воздействие, т. е. предполагать, что магнит окружен магнитным полем. Если окружить магнит

маленькими магнетиками, на них будет действовать магнитная сила. Можно ввести формальную характеристику такой силы — ввести силу, действующую в каждой точке на «пробный магнит» — *магнитную напряженность*. Магнитная сила изменяет форму траектории движущегося электрического заряда. Она направлена перпендикулярно направлению его движения, и работу над зарядом не совершает.

Мы не можем ввести магнитный потенциал, в точности подобный электрическому потенциалу, потому что изолированные электрические заряды есть, а изолированных магнитных зарядов нет. Мы уже говорили, что нельзя разделить северный и южный полюса магнита. Ломая магнит, мы получаем меньшие магнетики. И у каждого — два полюса. Поэтому-то в присутствии электрических зарядов (покоящихся или движущихся) электрическое и магнитное поля выступают неравноправно. С разными точками пространства нельзя связать скалярные величины, разность которых определяет работу магнитной силы по перемещению магнитного заряда из одной точки в другую. Нельзя это сделать уже прежде всего потому, что нет изолированных магнитных зарядов. Для электрических зарядов эта работа равна нулю. Нужна другая характеристика, определяющая поворот движущегося в магнитном поле заряда. А поворот характеризуется не только величиной, но и направлением в пространстве. Характеристика искривления траектории заряда, движущегося в магнитном поле, должна быть величиной векторной, обладающей и числовым значением, и направлением в пространстве.

Как мы скоро убедимся, во всех практических приложениях электромагнетизма мы имеем дело с непотенциальными электрическими полями, описываемыми так же, как и магнитные поля.

### Электромагнитная индукция

Если ток является источником магнитного поля, то не может ли магнитное поле быть источником тока? Постоянное магнитное поле вызывается постоянным током. Не может ли постоянное магнитное поле вызывать ток? Задавшись этим вопросом, Фарадей поставил опыт с двумя проводниками, намотанными по спирали на единый железный сердечник. По-

стоянный ток протекал по одному проводу, создавая в сердечнике магнитное поле. Но такое постоянное магнитное поле не создавало тока во втором проводе. Долгое время поиск электрического действия магнитного поля был безрезультатным. Неожиданно для себя Фарадей заметил, что в момент включения или выключения тока в первом проводе во втором проводе ток появляется. Так было установлено, что электрическим действием обладает не постоянное, а переменное во времени магнитное поле. Включение тока через спираль вызывало появление переменного магнитного поля в сердечнике, что в свою очередь вызывало появление тока во второй спирали. Было открыто явление *электромагнитной индукции*. Изучая это явление в разных аспектах, Фарадей вводит понятие «магнитных кривых». «Под магнитными кривыми я понимаю линии магнитных сил, хотя и искаженные соседством полюсов; эти линии вырисовываются железными опилками; к ним касательно располагались бы магнитные стрелочки», — так определил их Фарадей. Сегодня мы назовем их *магнитными силовыми линиями*. В противоречии с традицией Фарадей придает физический смысл формальному понятию силового поля. То, что было принято рассматривать только как формальное описание дальнего действия, Фарадей рассматривает как реальную физическую среду. Широко известное и до Фарадея любопытное свойство железных опилок выстраиваться вдоль направления действия магнитной силы становится в руках Фарадея мощным инструментом исследования свойств этой среды. «Экспериментатор, желающий изучать магнитную силу посредством проявления ее магнитными силовыми линиями, поступил бы произвольно и опрометчиво, отказавшись от самого ценного средства, от употребления железных опилок. Пользуясь ими, он может многие свойства этой силы, даже в очень сложных случаях, тотчас показать наглядно, может проследить глазом различные направления силовых линий и определить относительную полярность, может наблюдать, в каком направлении сила эта возрастает, в каком убывает, а в сложных системах может определить нейтральные точки, или места, где нет ни полярности, ни силы, даже если они встретятся внутри сильных магнитов». В статье «О физическом характере линий магнитной силы» Фарадей пишет: «Что

касается важного вопроса, подлежащего рассмотрению, то он заключается только в том, имеют ли линии магнитной силы физическое существование или нет». Ответ Фарадея,—положительный. Во введении к своему «Трактату об электричестве и магнетизме» Максвелл писал: «Фарадей своим мысленным взором видел линии сил, проходящие через все пространство там, где математики видели центры сил, притягивающиеся на расстоянии. Фарадей видел среду там, где они не видели ничего, кроме расстояния. Фарадей искал источник явлений в реальных процессах, происходящих в среде. Они же были удовлетворены тем, что нашли его в действующей на расстоянии силе, приложенной к электрическим флюидам».

Но интуитивно ясные соображения Фарадея не могли убедить его современников. Одно дело — его экспериментальные результаты, другое — теоретическая интерпретация. «Я заявляю, что с трудом могу себе представить, чтобы кто-нибудь, кто практически и количественно знает совпадение наблюдений и вычислений, основанных на законе действия на расстоянии, мог хотя бы мгновенно колебаться в выборе между этим простым и точным действием, с одной стороны, и чем-то столь неясным и неопределенным, как линия сил, с другой стороны», — утверждал известный ученый Эри в своем письме, датированном 1855 г. Это мнение разделяло большинство физиков, стремившихся объяснить электромагнитные явления на основе законов действия на расстоянии. Требовалось перевести качественные соображения Фарадея на математический язык, на язык уравнений, что и было сделано великим шотландцем Джеймсом Кларком Максвеллом.

### Электромагнитное поле

Итак, в середине XIX в. выявились два противоположных подхода к описанию электромагнитных явлений. Встал вопрос о том, действуют ли магниты или заряженные тела непосредственно на расстоянии, или существует некоторая среда, передающая магнитное воздействие одного магнита (или провода с током) другому, от одного электрически заряженного тела другому.

«Когда мы наблюдаем, что одно тело действует на другое на расстоянии, то прежде чем принять, что это действие прямое и непосредственное, мы обыкновенно исследуем, нет ли между телами какой-нибудь материальной связи; и если находим, что тела соединены нитями, стержнями или каким-либо механизмом, способным дать нам отчет о наблюдаемых действиях одного тела на другое, мы предпочитаем скорее объяснить действия при помощи этих промежуточных звеньев, нежели допустить понятие о прямом действии на расстоянии.

Так, когда мы, дергая за веревку, заставляем звонить колокольчик, то последовательные части веревки сначала натягиваются, а затем приходят в движение, пока, наконец, звонок не зазвонит на расстоянии посредством процесса, в котором принимали участие все промежуточные частицы веревки одна за другой. Мы можем заставить колокольчик звонить на расстоянии и иначе: нагнетая воздух в длинную трубку, на другом конце которой находится цилиндр с поршнем, движение которого передается звонку. Мы можем также пользоваться проволокой, вместо того, чтобы дергать ее, можем соединить ее на одном конце с электрической батареей, а на другом — с электромагнитом, и таким образом заставим колокольчик звонить посредством электричества.

Здесь мы указали три различных способа приводить звонок в движение. Но во всех этих способах есть то общее, что между звонящим лицом и звонком находится непрерывная соединительная линия и что в каждой точке этой линии совершается некоторый физический процесс, посредством которого действие передается с одного конца линии на другой. Процесс передачи не мгновенный, а постепенный; так что после того, как на одном конце соединительной линии дан импульс, проходит некоторый промежуток времени, в течение которого этот импульс совершает свой путь, пока не достигнет другого конца», — писал Максвелл в своей статье «О действиях на расстоянии». И далее отмечал: «Кому свойства воздуха не знакомы, тому передача силы посредством этой невидимой среды будет казаться столь же непонятной, как и всякий другой пример действия на расстоянии, и, однако, в этом случае мы можем объяснить весь процесс и опреде-

лить скорость, с которой действие передается от одного участка среды до другого.

Почему же мы не можем допустить, что знакомый нам способ сообщения движения посредством толчка и тяги нашими руками является видом и наглядным примером всякого действия между телами, даже в тех случаях, когда мы не можем заметить между телами ничего такого, что видимо принимало бы участие в этом действии».

Сторонники действия на расстоянии связывали с именем Ньютона традицию описания физических процессов непосредственным действием тел на расстоянии. Полемизируя с ними, Фарадей цитировал письмо Ньютона к Бентли\*), из которого следовало, насколько чуждым было самому Ньютону представление о непосредственном действии на расстоянии одного тела на другое:

«Непонятно, каким образом неодушевленная косная материя, без посредства чего-либо иного, что нематериально, могла бы действовать на другое тело без взаимного прикосновения, как это должно было бы иметь место, если бы тяготение, в смысле Эпикура, было присуще материи и с нею нераздельно... Что тяготение должно быть врожденным, присущим и необходимым свойством материи, так что одно тело может взаимодействовать с другим на расстоянии через пустоту, без участия чего-то постороннего, при посредстве чего и через что их действие и сила могли бы передвигаться от одного к другому, — это мне кажется столь большим абсурдом, что я не представляю себе, чтобы кто-либо, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому прийти».

Ньютон упорно искал среду, передающую гравитационное воздействие, и только потому, что не смог дать удовлетворительного доказательства ее существования и способов ее действия, не публиковал сообщений об этих поисках.

---

\*) Бентли — любопытная фигура. Духовное лицо, он активно занимался пропагандой научных знаний. Свои проповеди превращал в научно-популярные лекции. Не случайно вопрос о гравитационной неустойчивости равномерно распределенного вещества впервые обсуждался Ньютоном в письме к Бентли в связи с вопросом о вечности Вселенной или о сотворении Вселенной.



Максвелл, уверенный в существовании такой среды, передающей электромагнитное воздействие, разрабатывает математическое описание электромагнитных явлений на основе предсказания о близкодействии, на основе формализма *теории поля*, как мы ее называем сегодня, или динамической теории электромагнитного поля, как он ее назвал. Придавая идеям Фарадея форму математических уравнений, Максвелл создает физическую теорию, основанную на фундаментальном единстве электричества и магнетизма.

Работы Фарадея и Максвелла утверждали физическую реальность электромагнитного поля. Пространство, окружающее заряды, как бы оживало. Оно оказывалось в особом состоянии, обладало особыми свойствами. Открытие электромагнитной индукции позволило к этим свойствам подойти. Электрические и магнитные явления оказывались действительно взаимосвязаны. Но связь эта раскрывалась только в нестационарных процессах, через изменение со временем электрических и магнитных характеристик.

Покоящийся заряд окружает только электрическое поле. Движущийся заряд окружают и электрическое поле этого заряда и магнитное поле его тока. Движущийся заряд обладает и магнитным полем. Обычно в повседневной жизни — в металлических проводах электроосвещения или телефона — мы имеем дело со случаем равного количества положительных и отрицательных зарядов. Их электрические поля компенсируются, но их движения приводят к появлению магнитного поля. Такое поле действует, в свою очередь, только на движущиеся заряды — на токи. Таким образом, поле постоянного тока осуществляет только магнитное действие токов. Иное дело — случай переменного тока. В этом случае магнитное поле тоже оказывается переменным. И закон электромагнитной индукции определяет электрическое действие такого поля. Переменное магнитное поле — следствие переменного тока — оказывается источником электрического поля, движущего заряды в проводе и вызывающего в этом проводе электрический ток.

Мы пришли к понятию электрического поля, обсуждая свойства пространства, окружающего неподвижный заряд. Но теперь оказывается, что сами изменения свойств пространства, окружающего заряды движущиеся (электрический ток), — изменения маг-

нитного поля, в свою очередь, меняют свойства этого пространства — создают электрическое поле\*). Оказывается, электрическое поле может существовать и вне прямой связи с зарядами — его источником может быть и переменное магнитное поле. Такое электрическое поле также вызывает силу, действующую на заряды. Значит, это поле можно характеризовать силой, действующей на малый пробный заряд и отнесенной к величине этого заряда — электрической напряженностью. И сила эта будет совершать работу над пробным электрическим зарядом, помещенным в такое

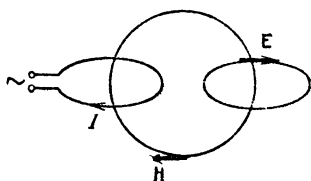


Рис. 2. Вихревое электрическое поле. Виток переменного тока создает переменное магнитное поле  $H$ , которое, в свою очередь, создает вихревое электрическое поле  $E$

электрическое поле. Заряженная частица будет ускоряться в таком поле так же, как она ускоряется в поле неподвижного заряда. Но в отличие от случая неподвижного заряда, в электрическом поле переменного магнитного поля работа электрической силы зависит от пути, по которому пробный заряд перемещается. В этом поле с замкнутыми силовыми линиями (рис. 2),

работа по замкнутому контуру не равна нулю. Поэтому с каждой точкой пространства нельзя связать величину ее электрического потенциала — работы по перемещению пробного заряда в эту точку. Такая величина не имеет смысла — ведь в рассматриваемом случае работа зависит от пути перемещения заряда. Электрическое поле, возникающее при электромагнитной индукции, нельзя характеризовать электрическим потенциалом. Это поле — *непотенциальное*. Циркуляция напряженности этого поля (см. Математическое дополнение, с. 211) — ненулевая. Поле электромагнитной индукции является циркулирующим — *вихревым*.

Итак, оказывается, существуют непотенциальные электрические поля. И это имеет важнейшие след-

---

\*) Здесь речь идет об изменениях поля — особого состояния пространства, а не об изменениях самого пространства, как это имеет место в общей теории относительности. О связи изменений поля и самого пространства речь впереди,

ствия. Именно эти поля обеспечивают работу трансформаторов и электродвигателей.

Замечательно, что изменение магнитного поля создает вихревое электрическое поле и вне проводов. А электрическое поле ускоряет заряженные частицы. Если магнитное поле меняется таким образом, что среднее поле внутри орбиты радиуса  $R$  меняется всегда ровно вдвое быстрее, чем поле на самой орбите, то нетрудно показать, что заряженная частица будет ускоряться под действием вихревого поля, оставаясь все время на той же орбите. Этот принцип ускорения заряженных частиц был использован в одном из первых ускорителей элементарных частиц — бетатроне (рис. 3).

Самостоятельная жизнь взаимосвязанных электрических и магнитных полей играет важнейшую роль и в технике, и в науке. А теперь отметим фундаментальное значение того, что источником электрического поля является переменное, а не постоянное магнитное поле.

Действительно, если бы постоянное магнитное поле было источником электрического поля, то был бы возможен «вечный двигатель». В самом деле провод с постоянным током является источником постоянного магнитного поля. Если бы постоянное магнитное поле было источником электрического поля, то в проводах, помещенных в такое поле, создавался бы ток, который в свою очередь создавал бы магнитное поле, а оно в свою очередь создавало бы ток в новых проводах и т. д. В результате одиночный провод с током становился бы бесконечным резервуаром энергии. Внешний источник тока в первом проводе можно было бы при этом отключить и получилось бы «perpetuum mobile». Поэтому то, что электрическим действием обладает переменное, а не постоянное магнитное поле, с необходимостью следует из невозможности «вечного движения».

Заметим в заключение еще один любопытный вывод. Если магнитное поле нарастает равномерно, т. е.  $H = at + b$ , где  $a$  и  $b$  — постоянные, то, казалось бы, может существовать стационарное вихревое поле. Но в действительности такое вихревое поле не может

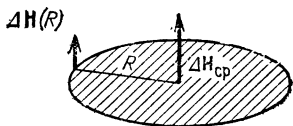


Рис. 3. Бетатрон. Для правильной работы бетатрона нужно, чтобы среднее магнитное поле внутри орбиты росло в два раза быстрее магнитного поля на самой орбите

быть всегда стационарным. Его существование требовало бы постоянного нарастания магнитного поля, поэтому строгая стационарность вихревого электрического поля могла бы обеспечиваться только магнитным полем, нарастающим до бесконечности ( $H \rightarrow \infty$ ), что невозможно.

### Теория Максвелла. Ток смещения

В своих уравнениях Максвелл соединил все известные к тому времени свойства электрических и магнитных явлений. Но записал он законы электрического и магнитного воздействия не через силы, действующие на расстоянии между зарядами и токами, а в терминах теории поля. Электрические и магнитные воздействия записывались как локальная связь (связь в малой окрестности произвольной точки пространства) между зарядами и токами и электрической и магнитной напряженностями, пространственные и временные изменения которых и вызывали воздействие на другие заряды и токи.

На языке теории поля все известные электромагнитные явления можно было описать на основе четырех дифференциальных уравнений, математическая формулировка и обсуждение которых приведены в Математическом дополнении, с 224. Отметим здесь только некоторые важные для дальнейшего изложения качественные черты теории Максвелла. Прежде всего, эта теория единообразно описывает и стационарные, и нестационарные электромагнитные явления, причем в случае нестационарных процессов уравнения Максвелла связывают пространственные и временные изменения электрического и магнитного полей. Соображения размерности требуют, чтобы в этом случае в уравнения входил коэффициент с размерностью скорости (см/с). Роль этого коэффициента, равного скорости света, мы обсудим ниже. А сейчас обратим внимание на другую важную модификацию теории нестационарных электромагнитных процессов, сделанную Максвеллом. Этой модификации требовала физическая картина, стоявшая перед его мысленным взором.

Исходя из симметрии между электричеством и магнетизмом, Максвелл предполагал, что должно существовать новое нестационарное явление, подобное явлению электромагнитной индукции. Если изменение со временем магнитной напряженности вызывает цир-

куляцию (о циркуляции см. Математическое дополнение, с. 211) электрической напряженности, то симметрия между электричеством и магнетизмом требует, чтобы изменение со временем электрической напряженности вызывало циркуляцию магнитной напряженности. В правую часть четвертого уравнения Максвелл добавил член, отвечающий этому явлению — добавил так называемый *ток смещения* — скорость изменения электрической напряженности со временем  $\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ .

Множитель  $1/c$  также возникает из соображений размерности. В нестационарном случае четвертое уравнение Максвелла принимает вид (см. Математическое дополнение, с. 227)

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}.$$

Какому явлению отвечает ток смещения?

Рассмотрим плоский конденсатор (рис. 4), пластины которого однородно заряжены. Поверхностная плотность заряда (заряд, приходящийся на единицу площади пластины) на левой пластине равна  $+\sigma$ , а на правой  $-\sigma$ . Электрическая напряженность в пространстве между пластинами направлена перпендикулярно пластинам (рис. 4) и равна по абсолютной величине

$$E = 4\pi\sigma.$$

Если мы соединим пластины конденсатора проводом, то конденсатор начнет разряжаться: положительные заряды с левой пластины будут перетекать на правую пластину и компенсировать ее отрицательный заряд. По проводу пройдет ток, равный скорости изменения заряда на пластинах конденсатора. Для его описания следует ввести мгновенную скорость изменения заряда пластин со временем (а это, как мы знаем, описывается производной по времени). Если площадь пла-

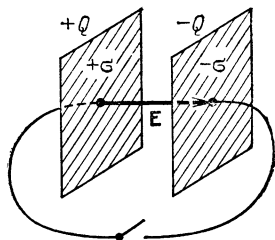


Рис. 4. Плоский конденсатор. На его пластинах равномерно распределены равные по величине и противоположные по знаку электрические заряды  $+Q$  и  $-Q$ , так что на единичной площади пластины содержится, соответственно, заряд  $+\sigma = +Q/S$  и  $-\sigma = -Q/S$ . (Здесь  $S$  — площадь пластины конденсатора.) Электрическое поле между пластинами конденсатора направлено перпендикулярно плоскости пластин и имеет величину  $E = 4\pi\sigma$

стины  $S$ , то заряд левой пластины составляет  $Q = +\sigma S$  (а правой  $-Q = -\sigma S$ ) и ток разряда  $I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(\sigma S)}{dt}$ . Число заряженных частиц должно сохраняться, поэтому-то скорость изменения заряда пластин равна току, текущему по проводу. Ясно, что заряды протекают с одной пластины на другую имен-

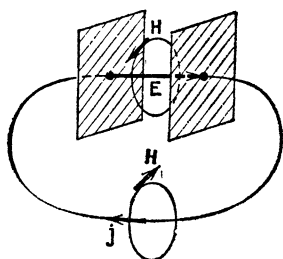


Рис. 5. Сохранение циркуляции магнитного поля  $\mathbf{H}$  по всему контуру требует, чтобы в области между пластинами конденсатора, где плотность тока  $\mathbf{j} = 0$ , циркуляция магнитного поля обеспечивалась плотностью тока смещения, равной  $\frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$

но по проводу, и в области между пластинами ток не течет.

Однако рассмотрим теперь циркуляцию магнитного поля по контуру, охватывающему этот провод (рис. 5). Эта циркуляция ( $\text{rot } \mathbf{H}$ ) должна равняться потоку через любую поверхность, опирающуюся на контур. Для поверхностей, пересекающих провод, — это  $\mathbf{j}$ , а для проходящих между пластинами конденсатора —  $\partial \mathbf{E} / \partial t$ . В этом смысле можно ввести представление о токе и в области между пластинами. Такой «ток» принято называть *током смещения*. Вектор плотности тока смещения должен

быть направлен перпендикулярно пластинам, а его величина должна составлять

$$j_{\text{см}} = \frac{I}{S} = \frac{1}{S} \frac{d(\sigma S)}{dt} = \frac{1}{4\pi} \frac{d(4\pi\sigma)}{dt} = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial E}{\partial t}.$$

Если мы хотим ввести ток, сохраняющийся по всему контуру, то в уравнении следует учитывать наряду с плотностью обычного тока еще и вектор плотности тока смещения  $\mathbf{j}_{\text{см}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ , так что

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} (\mathbf{j} + \mathbf{j}_{\text{см}}) = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

и мы получаем четвертое уравнение Максвелла.

Исследователи трудов Максвелла отмечают, что гипотеза о токе смещения возникает в работах Максвелла как бы сама собой, без специальных оговорок и раздумий. Может быть, здесь дело в том, что в физической картине, рассматривавшейся Максвеллом, ток смещения отвечал реальному перемещению заря-

дов в особой среде — эфире. В конце XIX в. существование эфира было опровергнуто. Эта интересная глава драмы идей подробно изложена в книге А. Эйнштейна и Л. Инфельда «Эволюция физики». Исходя из неверного постулата о существовании эфира, Максвелл получил правильные уравнения! Эти уравнения и сейчас составляют основу классической теории взаимодействия электрических зарядов и токов — электродинамики. Мы обсудим только несколько аспектов этих уравнений.

### Ток смещения и сохранение заряда

Гипотеза о токе смещения позволяет вывести из уравнений Максвелла одно важнейшее соотношение — закон сохранения электрического заряда.

Заряд — это количество электричества. Но что такое электричество? Создается ли оно, когда мы заряжаем палочку, натирая ее кусочком меха, или находится в палочке изначально и только перераспределяется между мехом и палочкой при трении, так что они получают равные заряды противоположного знака? Если мы окружим заряд металлической поверхностью, то на ней, как показал Кулон, будут наведены заряды: на внутренней поверхности появится заряд противоположного знака, на внешней — того же самого знака, что и исходный заряд. Поверхность оказывается заряженной — поднесите к ней электроскоп и его лепестки разойдутся. Поэтому, если бы трение порождало электричество, так что в эбонитовой палочке возникал бы заряд, не скомпенсированный равным по величине и противоположным по знаку зарядом кусочка меха, то, окружив лабораторию металлической поверхностью, можно было бы регистрировать появление наведенного на эту поверхность заряда. Фарадей провел внутри большой металлической клетки, окружавшей лабораторию, серию опытов по электризации трением самых разных предметов. Во всех этих опытах окружавшая лабораторию металлическая поверхность оставалась незаряженной — никакой некомпенсированный заряд при электризации не возникал. Но эти результаты еще не исключали возможность одновременного рождения в разных точках палочки и меха равных зарядов противоположного знака. Эту возможность исключает формулировка закона сохранения заряда, следующая из уравнений

Максвелла. Математическая теория, выведенная из опыта, содержит больше предсказаний (неожиданно больше! в заранее неизвестном направлении!) по сравнению с тем опытом, из которого родилась! Выведем уравнение сохранения заряда из уравнений Максвелла.

Возьмем производную по времени от левой и правой частей первого уравнения Максвелла. Мы получим

$$\frac{\partial}{\partial t}(\operatorname{div} \mathbf{E}) = 4\pi \frac{\partial \rho}{\partial t}.$$

В левой части можно переставить порядок дифференцирования — можно сначала найти частную производную  $\mathbf{E}$  по времени, а потом уже вычислять дивергенцию вектора  $\partial \mathbf{E} / \partial t$ , тогда получаем соотношение

$$\operatorname{div} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 4\pi \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (\text{A})$$

Заметим, что слева стоит дивергенция от плотности тока смещения. Найдем поэтому дивергенцию левой и правой частей четвертого уравнения Максвелла (в которое входит ток смещения):

$$\operatorname{div}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \frac{4\pi}{c} \operatorname{div} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \operatorname{div} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}.$$

Из общих свойств дифференцирования векторов следует, что слева в этом соотношении стоит нуль (см. Математическое дополнение, с. 219), а справа мы можем выразить дивергенцию плотности тока смещения через скорость изменения плотности заряда (из соотношения (A)). Тогда получаем

$$0 = \frac{4\pi}{c} \operatorname{div} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \operatorname{div} \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

и, окончательно,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{j} = 0. \quad (\text{B})$$

Мы получили соотношение между скоростью изменения плотности заряда и дивергенцией плотности тока. Это соотношение — локальное. Оно должно выполняться в любой сколь угодно малой области пространства. Если помножить обе части равенства на малый объем такой области  $V$ , то первый член будет равен  $V \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial (\rho V)}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t}$  — скорости изменения заряда внутри области, а второй член — «поток плотности тока через границу области», т. е. просто пол-



ному току через границу. Итак, полученное нами соотношение (В) действительно представляет собой закон сохранения заряда. Изменение заряда в данном месте может быть связано только с его притоком или оттоком. Причем это должно быть справедливо для сколь угодно малой области и сколь угодно малого интервала времени.

Поэтому появление заряда в каком-то месте может быть связано только с током, т. е. с перераспределением заряда. Следующая из уравнений Максвелла формулировка закона сохранения заряда запрещает появление заряда, не связанное с его перераспределением. Одновременное рождение равных зарядов противоположного знака в разных точках пространства оказывается невозможным: только электрический ток между этими точками может вызвать появление отрицательного заряда в одной точке и равного ему положительного заряда — в другой.

Заметим, что без гипотезы о токе смещения мы не смогли бы получить из уравнений Максвелла закон сохранения заряда. Опустив в четвертом уравнении ток смещения, мы пришли бы к соотношению

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0,$$

которое означало бы, что полный ток через любую замкнутую поверхность равен нулю. А это заведомо неверно. Например, для тока электрического разряда.

Подчеркнем, что ток смещения играет важную роль для вывода правильного выражения закона сохранения заряда, но сам в это выражение не входит. Соотношение  $\partial \rho / \partial t = -\operatorname{div} \mathbf{j}$  связывает скорость изменения плотности заряда с дивергенцией плотности реального тока. В этом соотношении  $\mathbf{j}$  — именно плотность тока, а не сумма плотности тока проводимости и тока смещения. Но о важнейшей роли тока смещения речь, пожалуй, впереди.

### Электромагнитные волны

«Теория, которую я предлагаю, — писал Максвелл в своей статье «Динамическая теория поля», — может быть названа теорией электромагнитного поля, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические и магнитные тела, и она может быть названа также динамической теорией, по-

сколько она допускает, что в этом пространстве имеется среда, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления».

Итак, вне зарядов и токов имеется среда, передающая их воздействие. Слово «среда» здесь — анахронизм, дань желанию построить механическую теорию эфира из зацепляющихся колесиков. Но суть дела не в словах и не в механической конструкции. Благодаря электромагнитным явлениям вне зарядов и токов, т. е. благодаря электромагнитной индукции и току смещения был получен вывод о возможности изменений электромагнитного поля, не связанных с зарядами и токами. Благодаря току смещения в уравнениях Максвелла появлялись решения нового типа — решения, описывающие распространение электромагнитных волн и обсуждаемые в Математическом дополнении, с. 227.

Эти решения отвечают волновому процессу взаимопревращения электрических и магнитных полей, распространяющемуся со скоростью  $c$ .

Скорость распространения электромагнитных волн  $c$  появилась в уравнениях Максвелла из соображений размерности. Выбрав единицы измерения электрического заряда, электрического тока, напряженностей электрического и магнитного полей, определив их связь из опытом Ампера и Фарадея, можно было найти числовое значение связывающих пространственные и временные изменения полей и потому имеющих размерность  $c$ . В двух уравнениях в отдельности константы зависят от единиц измерения. Однако результат для скорости распространения волны, конечно, не зависит от этого. Опыты Ампера и Фарадея не имели дела с волнами, но они позволили определить скорость распространения электромагнитной волны. Они дали для этой скорости величину, равную  $c$  — скорости света. Эта скорость оказалась равной  $300\,000\text{ км/с} = 3 \cdot 10^{10}\text{ см/с}$ . Скорость распространения электромагнитных волн оказалась равной скорости света! Это совпадение не было случайным. Оно подтверждало электромагнитную природу света.

«Иногда я думаю, что согласился бы, чтобы меня заперли в подземной тюрьме, на десять сажен под землей, куда не проникал бы луч света, если бы только взамен я мог узнать, что же такое свет», —

говорит Галилей в пьесе Брехта «Жизнь Галилея». Природа «очевидного», того, что «бросается» нам в глаза, как только мы их открываем, природа света долгое время была непонятной. Для древних греков было даже совсем не очевидно, что свет приходит в глаза извне, и выражение «свет очей» они употребляли буквально. Первый постулат «Оптики» Евклида так и формулировался: «Испускаемые глазами лучи распространяются по прямому пути».

Да, лучи света, испускаемые, конечно, не глазами, а источниками света, распространяются по прямой. Так летели бы частицы, летели бы камни, летели бы любые предметы: если бы их не отклоняло земное притяжение. Если частицы летят очень быстро, то отклонение незаметно. Если частиц очень много и они очень мелкие, их полет сливается в один непрерывный поток. Может быть, свет — это поток мельчайших быстрых частиц? Гипотеза о частицах (корпускулах) света делала естественными законы геометрической оптики. Упругие столкновения частиц света с гладкой поверхностью объясняли явления отражения. Изменение скорости движения частиц в разных средах объясняло преломление света на границе разных сред.

Но почему частицы света отражаются при столкновении с поверхностью? Почему потоки этих частиц не рассеиваются внутри прозрачных тел и распространяются в них прямолинейно? Почему такие потоки не рассеиваются друг на друге? Свет исходит от огня, от пламени, сконцентрированный свет способен зажигать предметы.

Световые явления трудно объяснимы для частиц вещества и очень естественны для волнового движения. Свет подобен волнам звука, подобен волнам по поверхности воды, утверждали сторонники волновой теории света.

Оба эти представления — о частицах (корпускулах) света и о волнах света — были отчетливо сформулированы в XVII в. и противоборствовали почти два столетия. Но вот в начале XIX в. Юнг формулирует общий принцип интерференции света: «Представьте себе ряд одинаковых волн, бегущих по поверхности озера с определенной постоянной скоростью и попадающих в узкий канал, ведущий к выходу из озера. Представьте себе далее, что по какой-либо иной аналогичной причине возбуждена другая серия волн той

же величины, приходящих к тому же каналу с той же скоростью одновременно с первой системой волн. Ни одна из этих двух систем не нарушит другой, но их действия сложатся: если они подойдут к каналу таким образом, что вершины одной системы волн совпадут с вершинами другой системы, то они вместе образуют совокупность волн большей величины; если же вершины одной системы волн будут расположены в местах провалов другой системы, то в точности заполняют эти провалы и поверхность воды в канале останется ровной. Так вот, я полагаю, что подобные явления имеют место, когда смешиваются две порции света; и это наложение я называю общим законом интерференции света». В первой половине XIX в. интерференция света была установлена на опыте. Был подтвержден целый ряд предсказаний волновой теории. А в 1845 г. Фарадей сообщает о наблюдавшемся им вращении плоскости поляризации света в прозрачном теле, помещенном в магнитном поле. Оправдывая название своей статьи «Намагничивание света и освещение магнитных силовых линий», Фарадей делает примечание в корректуре: «Я полагаю, что в опытах, описываемых мною в настоящей статье, свет испытал на себе магнитное действие, то есть, что магнитному действию подвергалось то, что является магнитным в силах материи, а последнее, в свою очередь, воздействовало бы на то, что является подлинно магнитным в силе света» \*).

И вот, наконец, числовое совпадение постоянной, связывающей электромагнитные единицы, с величиной скорости света. Его отмечал в 1964 г. Вебер, но в чем истинный смысл такого совпадения? Веберу он был не ясен. Ответ дал Максвелл в своем «Трактате об электричестве и магнетизме»:

«В различных местах этого трактата делалась попытка объяснения электромагнитных явлений при помощи механического действия, передаваемого от одного тела к другому при посредстве среды, занимающей пространство между этими телами. Волновая

---

\*) В архиве Королевского общества было обнаружено письмо М. Фарадея, датированное 1832 годом, в котором обсуждалась электромагнитная природа света. Это письмо было написано, когда Максвеллу был всего год отроду.

теория также допускает существование какой-то среды. Мы должны теперь показать, что свойства электромагнитной среды идентичны со свойствами световой среды...

Мы можем получить числовое значение некоторых свойств среды, таких, как скорость, с которой возмущение распространяется через нее, которая может быть вычислена из элементарных опытов, а также наблюдается непосредственно в случае света. Если бы было найдено, что скорость распространения электромагнитных возмущений такова же, как и скорость света..., мы получили бы серьезное основание для того, чтобы считать свет электромагнитным явлением, и тогда сочетание оптической и электрической очевидности даст такое же доказательство реальности среды, какое мы получаем в случае других форм материи на основании совокупности свидетельств наших органов чувств».

Поэтому Максвелл рассматривает числовое совпадение скорости распространения электромагнитных волн и скорости света как «подтверждение электромагнитной теории света».

В своих воспоминаниях Лаура Ферми рассказывает, как ее муж Энрико Ферми втолковывал ей, что раз скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света, то «значит, свет — это электромагнитные колебания» и сердился, что она этого не понимает. Настоящему физику очевидно, что совпадение скорости не может быть случайным. Но обратимся к следующему витку логики — ведь скорость безмассовых нейтрино и гравитационных волн тоже должна быть равна  $c$  — а это не электромагнитные волны. Уверенность в том, что свет это электромагнитные волны, до совсем недавнего времени основывалась на всем комплексе данных об электромагнетизме (на существовании и закономерности переходов электронов в атомах, на существовании и свойствах радиоволн и т. д.). Наконец, в последние годы релятивистские электроны в ондуляторе (устройстве, предназначенном для создания периодических полей, действующих на проходящие в них заряженные частицы) (рис. 6) и синхротронное излучение в оптическом диапазоне в электронных накопителях обеспечили прямое получение света как электромагнитных колебаний.

Так на основе теории Максвелла было достигнуто единое описание электрических, магнитных и световых явлений. Создатели современных теорий единого описания фундаментальных сил природы не случайно упоминают Максвелла как своего великого предшественника. В свете современного развития теоретической физики, о котором мы будем говорить дальше, теорию Максвелла можно назвать Великим объединением XIX в. В этой связи весьма поучительно обратить внимание на формулируемый самим Максвеллом фундамент такого объединения. Максвелл говорит о единой среде, единстве электромагнитного и светового эфира. Объединение произошло на основе единого эфира. Физика XX в. исключила эфир, но сохранила объединение. Устранила фундамент (точнее то, что считали фундаментом строители), сохранив саму конструкцию. Так строят арки и мосты — и убирают строительные леса.

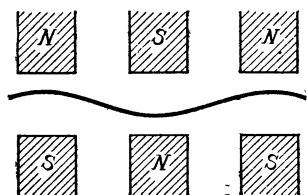


Рис. 6. Движение электронов по синусоидальной траектории в ондуляторе вызывает электромагнитное излучение в оптическом диапазоне. Здесь электромагнитная природа света проявляется «очевидным» образом

## Распространение электромагнитных волн

Итак, теория Максвелла позволила объяснить физическую природу света. Но помимо объяснения света она содержала и предсказание: есть и другие невидимые глазом электромагнитные колебания, они переносят электромагнитное воздействие, они распространяются с конечной скоростью, с той же, что и свет.

Заряд — источник поля. Покоящийся — электрического, равномерно движущийся — постоянный ток — магнитного. Если заряд меняет состояние своего движения, начинает двигаться, или, наоборот, останавливается — поле должно измениться. А изменения поля в теории Максвелла передаются от точки к точке. С конечной скоростью. Со скоростью света. В виде электромагнитных волн.

Если мы находимся на расстоянии  $R$  от заряда, то только через время  $t = R/c$ , где  $c$  — скорость света, до нас дойдет сигнал об изменениях его состояния движения. Но, с другой стороны, в момент  $t = R/c$  до нас дойдет сигнал только о том, что происходило с зарядом в момент  $t = 0$ . Как изменялось движение заряда в более поздние моменты времени, мы в этот момент узнать не можем. Если изменение было кратковременным, столь же кратковременным будет и воздействие на расстоянии  $R$  через время  $R/c$ .

С любым ограниченным во времени процессом изменения состояния движения заряда связан ограниченный во времени сигнал. На расстоянии  $R$  от заряда сначала через время  $R/c$  придет передний фронт волны — сигнал о начале изменения, потом, в течение всего времени процесса  $\Delta t$  будет поступать его воздействие, и, наконец, спустя время  $\Delta t$  процесс завершится, в момент  $R/c + \Delta t$  закончится и его воздействие на расстоянии  $R$ . Окончание процесса, запаздывая на время прохождения сигнала  $R/c$ , обрывает сигнал. У электромагнитной волны имеется передний и задний фронты, характеризующие начало и конец действия источника волны. Действие источника запаздывает на время, за которое сигнал распространяется от источника до данного места.

Изменение состояния движения электрического заряда меняет окружающее заряд поле. Изменение поля распространяется от точки к точке. Доходит до других зарядов. Меняет их состояние движения подобно тому, как волна от опущенной в воду палки вызывает колебания покоившихся на поверхности воды палочек.

Бросим в пруд камень. От него пойдут волны, и веточки, покоившиеся на поверхности воды, начнут колебаться в такт волне. Пройдет немного времени, и поверхность воды успокоится. Опустившийся на дно камень вытеснил немного воды. Уровень воды в пруду поднялся, но на глаз это не заметно. Так незаметное вдали от заряда изменение его стационарного поля вызывает заметный сигнал об этом изменении \*).

---

\*) Заметим, что приведенное сравнение не является точной аналогией. Распространение волн на поверхности воды происходит в двух измерениях, и в этом случае у волны отсутствует задний фронт, характерный для волн в трех и одном измерениях. Круги волн еще долго расходятся по поверхности воды после кратковременного возмущения этой поверхности брошенным камнем.

Электрическое поле неподвижного заряда спадает обратно пропорционально квадрату расстояния от него, а вот электрическое поле электромагнитной волны спадает с расстоянием медленней — обратно пропорционально только первой степени расстояния. Проще всего понять, почему поле волны должно зависеть от расстояния именно так, из соображений сохранения энергии.

Если произошло какое-то изменение состояния движения точечного заряда — он начал двигаться или

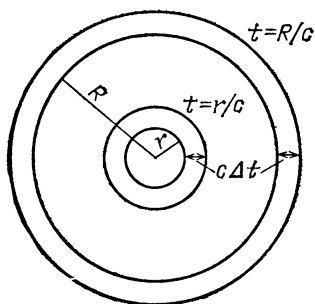


Рис. 7. Электромагнитный сигнал длительностью  $\Delta t$  приходит на расстояние  $r$  от источника за время  $r/c$ , а на расстояние  $R$  — за время  $R/c$ . При этом энергия сигнала сосредоточена в сферическом слое толщиной  $c\Delta t$

остановился — его поле должно меняться во всех направлениях — от этого заряда побежит сферическая электромагнитная волна. По мере распространения волны радиус  $R$  растет, расстояние между передним и задним фронтом волны не меняется. Для процесса длительностью  $\Delta t$  оно равно  $c\Delta t$ . При распространении волны меняется только площадь поверхности ее фронта  $4\pi R^2$  (рис. 7). Поэтому объем, занимаемый сферической волной, составляет  $V = 4\pi R^2 c\Delta t$ . Электромагнитная волна несет определенную энергию. Распространяясь со скоростью

света во всех направлениях, волна сохраняет свою энергию. Как мы увидим в дальнейшем, плотность энергии волны (энергия в единице объема) пропорциональна среднему квадрату ее электрической напряженности, (знак напряженности может меняться, в волне оказывается, что ее среднее значение равно нулю, а вот квадрат напряженности — величина существенно положительная, его среднее значение нулю не равно). Сохранение энергии волны означает, что сохраняется величина  $E^2 V = E^2 \cdot 4\pi R^2 c\Delta t$ , т. е. в сферической электромагнитной волне произведение  $ER$  постоянно. Получаем, что напряженность поля волны спадает обратно пропорционально  $R$ .



Но это значит, что на очень больших расстояниях, на которых пренебрежимо постоянное электрическое поле, на которых уже не заметно непосредственное электростатическое воздействие заряда на заряд, переменное поле волны может быть заметным. Колебания одного заряда вызовут колебания поля, а колебания поля вызовут колебания другого заряда, находящегося вдали от первого. Благодаря электромагнитным волнам возможна передача сигнала на большие расстояния. Свойства света дают возможность определить, откуда, с какого направления пришли волны — и очень много узнать об их источнике.

Г. Герц провел первые опыты с искусственно созданными генераторами электромагнитных волн. Он доказал в своих исследованиях, что электромагнитные волны действительно существуют. Но Г. Герц так и не узнал о важнейшем практическом следствии своих исследований. Спустя год после его смерти, 7 мая 1895 г., А. С. Попов сообщил о возможности приема электромагнитных сигналов, а 24 марта 1896 г. с помощью своих приборов Попов передал первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц»...

Возникла радиосвязь. Для ее технического внедрения многое сделал Г. Маркони, подавший в 1896 г. заявку и получивший в 1897 г. патент на применение электромагнитных волн для беспроволочной связи. Но нельзя забывать, что роль первооткрывателя радиосвязи принадлежит А. С. Попову.

### **Электричество, магнетизм и принцип относительности**

Если электрический заряд покоится, он является источником электрического поля. Если же заряд движется, то течет электрический ток — источник магнитного поля. Движущийся заряд одновременно является источником и электрического и магнитного поля. Однако, сказав «движущийся», мы упустили одно важное обстоятельство: относительно кого движущийся? Ведь мы можем двигаться сами, вслед за движущимся зарядом, мы, в принципе, можем его нагнать и двигаться с той же скоростью, что и он. Но тогда какой же это движущийся заряд? Для движущегося вместе с зарядом наблюдателя заряд

выглядит как покоящийся, такой наблюдатель не видит движения заряда, не может наблюдать никакого тока. Но если заряд покоящийся, и тока нет — нет и источника магнитного поля. Для движущегося с зарядом наблюдателя магнитное действие заряда должно исчезать. Но мы-то знаем, что заряд движется. Его магнитное поле действует на провод с током. Нам жаль беднягу движущегося наблюдателя: наблюдать-то ему нечего. Зря только следит за своим проводом — на него не может действовать никакая сила. Провод с током, как нам кажется, электрически нейтрален. Электростатической силы быть не должно. В его системе заряд покоится, тока нет, значит и магнитное поле на провод не действует. «Остановись! — крикнем мы ему. Он остановится и спросит, в чем дело. «Зря следишь за своим проводом: тебе же нечего наблюдать». — «Как нечего? На мой провод действует точно такая же сила, что и на ваш», — с удивлением скажет он и продолжит свое движение вместе с зарядом.

Что же произошло? По нашему представлению движущийся вместе с зарядом наблюдатель не должен обнаруживать никакого действия заряда на провод с током — а он его обнаруживает.

Здесь в игру вступает фундаментальный физический принцип — *принцип относительности*. Впервые этот принцип сформулировал для физических процессов Галилео Галилей в своем знаменитом «Диалоге о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой»:

«Уединитесь с кем-либо из друзей в просторное помещение под палубой какого-нибудь корабля, запаситесь мухами, бабочками и другими подобными мелкими летающими насекомыми; пусть будет у вас там также большой сосуд с водой и плавающими в нем маленькими рыбками: подвесьте далее, наверху, ведро, из которого вода будет капать капля за каплей в другой сосуд с узким горлышком, подставленный внизу. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте прилежно, как мелкие летящие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения; рыбы, как вы увидите, будут плавать безразлично во всех направлениях; все падающие капли попадут в подставленный сосуд, и вам, бросая друг друга какой-нибудь предмет, не придется бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую, если

расстояния будут одни и те же; и если вы будете прыгать сразу двумя ногами, то сделаете прыжок на одинаковое расстояние в любом направлении. Прилежно наблюдайте все это, хотя у нас не возникает никакого сомнения в том, что, пока корабль стоит неподвижно, все должно происходить именно так. Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью и тогда (если только движение будет равномерным и без качки в ту или другую сторону) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется ли корабль или стоит неподвижно...»

Согласно принципу относительности любому физическому процессу, наблюдаемому в одной системе отсчета, можно сопоставить другой процесс, наблюдаемый в системе отсчета, движущейся относительно первой равномерно и прямолинейно, что делает обе системы неразличимыми. Но есть и другая формулировка принципа относительности: одно и то же явление можно описать в двух разных системах внешне по-разному, но физическая природа явления остается при этом неизменной. Так, свободное равноускоренное

падение тела под действием силы тяжести  $z = -\frac{gt^2}{2}$ ,

$x = y = 0$  в одной системе есть движение по прямой, но для равномерно движущегося относительно этой

системы наблюдателя это падение есть  $z = \frac{gt^2}{2}$ ,

$x = vt$ ,  $y = 0$  — движение по параболе. Очевидно, что причина падения — тяготение — при этом одна и та же. К концу XIX в. принцип относительности считался твердо установленным для механических процессов. Но при анализе явлений электромагнитных возникали парадоксы, связанные с тем, что скорость распространения электромагнитного воздействия не бесконечна, что она конечна и равна скорости света. Это обстоятельство заставляет более строго относиться к понятиям, которые нам кажутся очевидными. С подобным парадоксом мы и столкнулись.

Последовательное применение принципа относительности к электрическим и магнитным явлениям с учетом конечной скорости распространения взаимодействия легло в основу *специальной теории относительности*. Поясним на основе этой теории, почему же

все-таки и мы, и движущийся с зарядом наблюдатель наблюдаем одно и то же явление.

Согласно теории относительности любой физический процесс происходит одинаково для неподвижного наблюдателя и для наблюдателя, движущегося прямолинейно и равномерно. Физический процесс — взаимодействие движущегося заряда и провода с током — одинаков и в неподвижной, и в движущейся равномерно и прямолинейно системах отсчета. Но причины

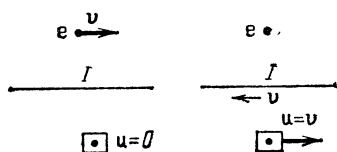


Рис. 8. Неподвижный наблюдатель (его скорость  $u = 0$ ) наблюдает электрон, движущийся со скоростью  $v$ , и неподвижный провод с током  $I$ . Для наблюдателя, движущегося со скоростью  $u = v$ , электрон неподвижен, а движется со скоростью  $v$  провод с током

взаимодействия объясняются неподвижным и движущимся наблюдателями по-разному (рис. 8). Неподвижные наблюдатели — мы — наблюдаем действие магнитного поля движущегося заряда. Вещество провода с током для нас электрически нейтрально. Электрическое поле заряда на него не действует. А как объясняет взаимодействие заряда и провода с током

движущийся наблюдатель? Для него заряд неподвижен — наблюдатель движется вместе с зарядом. Поэтому он не может говорить о действии магнитного поля заряда. Но — и тут-то вступает в игру теория относительности — для него провод с током уже не электрически нейтрален. Он наблюдает не только определенную плотность тока в проводе. Он наблюдает определенную плотность электрического заряда. Причем эта плотность заряда оказывается точно такой, которая необходима, чтобы вызвать силу электрического взаимодействия заряда с проводом, равную наблюдаемой нами силе магнитного взаимодействия движущегося заряда и тока.

Итак, получается, что на вещество провода оказывает воздействие некоторое особое состояние пространства, окружающего заряд. В связанной с нами системе отсчета мы называем это состояние пространства магнитным полем. В системе, движущейся вместе с зарядом, — электрическим полем. Принцип относительности говорит нам, что воздействие в любой инерциальной системе отсчета будет тем же самым. Но

это значит, что названия «электрическое поле» и «магнитное поле» до некоторой степени условны. Одно и то же воздействие, вызываемое одним и тем же состоянием пространства, в разных системах отсчета мы называем по-разному. В действительности *нет* чисто электрического и чисто магнитного взаимодействия — есть единое взаимодействие, по-разному называемое в разных системах отсчета.

В том же смысле нет разницы между движущимся и неподвижным зарядом — в разных инерциальных системах один и тот же заряд мы называем неподвижным зарядом или зарядом движущимся — электрическим током. Так теория относительности соединяет заряд и ток в единое целое.

Здесь же сразу укажем, что полной эквивалентности все же нет. Покоящийся электрический заряд — источник электрического поля. Движущийся — электрического и магнитного. Не существует, однако, такой системы отсчета, в которой он являлся бы источником одного только магнитного поля. С другой стороны, провод с током в неподвижной системе отсчета обладает одной только плотностью тока, а плотность заряда в нем равна нулю. В движущейся системе отсчета мы наблюдаем в нем наряду с плотностью тока и плотность заряда. Не существует, однако, такой системы отсчета, в которой в нем наблюдалась бы одна только плотность заряда и не наблюдалась бы плотность тока.

Физическая природа такой неэквивалентности связана со строением вещества. В веществе есть электрические заряды, а магнитных зарядов нет. В пустоте электрическое и магнитное поля выступают равноправно, как, например, в электромагнитной волне. При наличии вещества именно потому, что в нем существуют электрические заряды, электростатическое поле приводит к разряду и не может быть сделано сколь угодно большим. Если электрическое и магнитное поля измеряются в одних и тех же единицах (как это имеет место в системе единиц, применяемой в атомной физике), то оказывается, что магнитные поля могут быть на практике значительно больше, чем электрические.

Теория относительности накладывает ограничения и на взаимное превращение электрических и магнитных полей в движущихся системах отсчета. Оказы-

ваются, что независимо от системы отсчета величины  $E^2 - H^2$  и  $E \cdot H$  имеют одно и то же значение. Поэтому, если в какой-то системе  $E$  и  $H$  направлены перпендикулярно друг другу, так что  $E \cdot H = 0$ , то так будет и во всех других системах отсчета. Если в какой-то системе, например,  $E \neq 0$ , а  $H = 0$ , то в движущейся системе появляется *наряду* с электрическим и магнитное поле:  $E \neq 0$  и  $H \neq 0$ . Однако в этом случае не существует системы отсчета, в которой имеется только магнитное поле, а электрическое поле отсутствует. Более того, в любой системе сохранится неравенство  $|E| > |H|$ .

Порожденная парадоксами, связанными с конечностью скорости света, специальная теория относительности вышла благодаря гению Эйнштейна далеко за рамки электромагнетизма, изменив привычные представления о пространстве и времени. Вследствие конечной скорости распространения сигналов, измерения пространственных и временных интервалов потеряли свой абсолютный смысл. Временной промежуток между двумя событиями и расстояние между ними в пространстве выступают как временная и пространственная компоненты единого пространственно-временного 4-вектора. (Что такое вектор и, в частности, 4-вектор, вы можете узнать в Математическом дополнении, с. 188.) Величина этих компонент зависит от выбора движущейся системы отсчета, и определенным образом меняется при переходе к другой системе, отражая связь этих компонент. Отсылая интересующего читателя к многочисленной популярной литературе по теории относительности или к учебнику физики для 10 класса, отметим, что в теории относительности понятия плотности заряда и плотности тока оказываются связанными. Они становятся временной и пространственной компонентами единого 4-вектора плотности электромагнитного тока. Но связь между этими компонентами подчиняется определенным условиям, она не может быть произвольной. Относительность понятий не меняет некоторых абсолютных, не зависящих от системы отсчета связей.

## КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

---

На экзамене.

Дж. Дж. Томсон (*студенту*): «Что такое электрон?»

Студент: «Простите, профессор. Я знал, но забыл».

Дж. Дж. Томсон: «Как Вы посмели забыть!? Вы были единственным, кто это знал!»

Студенческий фольклор

### Загадки электрона

К концу XIX в. целостная картина взаимосвязи частиц, зарядов и полей завершилась открытием электрона. Катодные лучи наблюдались с середины XIX в., но только к концу века было установлено, что эти лучи — поток элементарных составляющих атомов — *электронов* \*). Казалось, можно было подвести итоги и завершить здание классической физики.

Вырисовывалась такая картина. Вещество состоит из атомов. В состав атомов входят электроны, обладающие единичным электрическим зарядом. Существуют и свободные электроны. Электроны окружает особое состояние пространства — электромагнитное поле. Это поле обеспечивает связь электронов в атомах. Электрический заряд электрона — мера его электрического взаимодействия. Электрон неуничтожим, поэтому сохраняется электрический заряд. Все многообразие форм окружающей нас Природы — результат перемещений, соединений и перераспределений электронов.

Итак, картина мира сводилась к единому началу. Найден был единый кирпичик всего сущего. Развитие физики, казалось, подошло к концу... Оставалось всего несколько уточнений.

Но в конце XIX в. была открыта *радиоактивность*. Радиоактивные элементы стали использовать как источники энергичных частиц, способных проникать в глубь атома. И в XX в. глубины атома стали исследоваться.

---

\*) Действие этих лучей мы наблюдаем ежедневно в трубке телевизора (если, конечно, наш телевизор работает).

Электрон имеет отрицательный электрический заряд, а атом электронейтрален. Поэтому в атоме должен присутствовать и положительный заряд, компенсирующий заряд электронов. Томсон полагал, что положительный заряд однородно распределен по всему атому. В этой модели атом был подобен пудингу с изюмом. В роли изюма выступали электроны.

В опытах Резерфорда, бомбардировавшего атомы  $\alpha$ -частицами, было установлено, что внутри атома имеется плотное ядро, размером в десять тысяч раз меньше размера атома, и именно в этом плотном положительно заряженном ядре и сосредоточена почти вся масса атома. Этот результат противоречил модели Томсона. Получалось, что атом неоднороден, и скорее похож на Солнечную систему. Ведь Солнце с радиусом в несколько тысяч раз меньшим орбиты Плутона имеет массу, в тысячу раз превосходящую сумму масс всех планет Солнечной системы. Возникла простая аналогия: Солнце — ядро атома, планеты — отрицательные электроны. Нильс Бор так и назвал такую модель атома — *планетарная*. Но имелось одно существенное отличие атома от Солнечной системы. Вращение электрона вокруг ядра должно было бы, казалось, приводить к излучению электромагнитных волн. Вращающийся электрон должен был бы терять энергию на излучение, переходя на все более близкую к ядру орбиту. Интенсивность излучения при этом только возрастала бы, ускоряя падение электрона на ядро. Можно рассчитать, что если бы такое падение действительно происходило, атом не просуществовал бы и миллиардной доли секунды. Чтобы устранить это противоречие в теории атома, Бор постулировал, что есть такие орбиты, находясь на которых электрон не излучает. При этом атомы, в которых электроны находятся на одинаковых стационарных орбитах, неотличимы друг от друга, тождественны.

Стационарная орбита отвечает определенной энергии взаимодействия электрона и ядра. Разные орбиты отвечают разным значениям этой энергии. Если электрон оказывается на более удаленной орбите, он может перескочить на более низколежащую орбиту, и при этом его энергия изменяется на определенную порцию энергии, равную разности энергии конечной и начальной орбит. Существует самая низколежащая орбита, отвечающая нижнему основному состоянию





атома. В теории Бора переход с одной стационарной орбиты на другую сопровождался испусканием кванта электромагнитного излучения. (Из нижнего основного состояния такой переход невозможен.) Но уже существовала формула Планка, связывавшая энергию кванта излучения  $E$  с его частотой  $\omega$ . Зная разность энергий начальной и конечной орбит, можно было определить частоту излучения. Это сразу давало объяснение спектров излучения атомов. Атомная спектроскопия становилась понятней \*). Тем самым теория атома связывалась с теорией квантов излучения, предложенной за десятилетие до теории Бора. *Атомная физика оказывалась физикой квантовой!* Подчеркнем гигантское различие с классическими представлениями для основного состояния атома: находясь на самой низколежащей орбите электрон не излучает! Для более удаленных орбит различие более тонкое: в классической теории электроны должны были бы излучать, находясь на этих орбитах. В теории Бора излучение возможно только при переходе с одной орбиты на другую, находясь на орбите электрон не излучает.

Теория квантов была предложена Планком в 1900 г. для объяснения термодинамических свойств абсолютно черного тела. Разумное описание таких свойств получалось только в предположении, что излучаться может только определенная порция — квант энергии излучения, причем энергия кванта  $E$  связывалась с частотой (или длиной волны) излучения, а импульс  $p$ , как показал Эйнштейн, связывался с волновым вектором  $k$  (длиной волны  $\lambda = 2\pi/k$ ) универсальным законом

$$E = h\nu, \quad p = \hbar k. \quad (C)$$

Коэффициент пропорциональности  $h$  являлся, по предположению Планка, новой фундаментальной постоянной. Как показал Эйнштейн в 1905 г., теория квантов объясняла не только термодинамику излучения, но и явления фотоэффекта. Для этого нужно было только предположить, что соотношение (C) не является свойством процесса излучения. Это соотношение должно было описывать свойства самого излу-

---

\*) Полное понимание структуры многоэлектронных атомов пришло только после привлечения принципа Паули (см. ниже).

чения. Само электромагнитное излучение должно было обладать квантовой природой. Электромагнитное излучение должно было, по предположению Эйнштейна, состоять из частиц — *фотонов* — квантов электромагнитных волн. Электромагнитные волны приобретали свойства частиц.

С другой стороны, частицы все более явно проявляли волновые свойства.

Де Бройль выдвинул смелое предположение, что электроны представляют собой волны материи, вместо частицы — электрона с импульсом  $p$  — надо рассматривать волну с длиной волны  $\lambda = 2\pi\hbar/p$ , где  $2\pi\hbar = h$  — та самая фундаментальная постоянная, которая была введена Планком в теории квантов излучения. Свободно движущийся электрон рассматривался как волна бегущая (как, например, волна на поверхности воды), а электрон, связанный в атоме, — как собственные колебания определенной частоты. Пример таких колебаний дают колебания веревки с жестко закрепленными концами. При расстоянии  $L$  между концами веревки устойчиво возбуждаются только колебания длиной волны  $\lambda = L/2\pi n$ . Поэтому у веревки с неподвижными концами волновое число  $k = 1/\lambda$  может иметь только дискретные значения  $k = \frac{2\pi n}{L}$ , где  $n$  — целое число. В атоме волна бежит по орбите и должна для стационарности картины удовлетворять условию  $\lambda = 2\pi r \cdot n$ . Так на основе волновой теории объяснялась природа стационарных электронных оболочек в атоме.

Достоинством волновой теории было и то, что она могла явно учесть соотношения специальной теории относительности. Энергия частицы  $E$  и импульс  $p$  составляют 4-вектор. В волновой теории 4-вектор составляют частота  $\omega$  и волновой вектор  $k$  (о 4-векторах см. Математическое дополнение, с. 188).

Но ведь электрон обладает электрическим зарядом. Как распределен электрический заряд в электронной волне? В процессах рассеяния жесткого рентгеновского излучения на атомах наблюдался эффект Комптона: рассеяние электромагнитного кванта на электроны в атоме. Комптоновское рассеяние происходило всегда так, как если бы электроны взаимодействовали с фотоном как точечный заряд. Попытки описать электронную оболочку как размазанное в объеме

атома «вещество электрона» оказались безуспешными. По предположению М. Борна волнам материи была дана иная интерпретация. Волна материи одиночного электрона отвечает «волне вероятности». Электрон описывался волновой функцией  $\psi$ , квадрат которой (точнее, квадрат модуля)  $|\psi|^2$  определял вероятность нахождения электрона в том или ином месте. Но это означает, что ответ на вопрос, где находится электрон, нельзя получить с определенностью. Может здесь, а может, и не здесь. Он может находиться в любом месте, где  $|\psi|^2 \neq 0$ . Физическое описание становится неопределенным. Более того, неопределенность возводилась в принцип — в *принцип неопределенности*, предложенный В. Гейзенбергом.

### Атом. Принцип Паули

Какова же вероятность нахождения электрона в данном месте? Как она меняется со временем? На эти вопросы отвечало основное уравнение квантовой механики — *уравнение Шредингера*.

Решив это уравнение, можно было получить ответы на многие вопросы, связанные с загадочным поведением электрона.

Квантовая механика дает уравнение для комплексной волновой функции  $\psi(r, t)$ . Квадрат модуля этой комплексной величины (см. Математическое дополнение, с. 221), т. е. величина  $\psi^*(r, t) \cdot \psi(r, t) = P(r, t) > 0$  определяет вероятность нахождения электрона в данной точке пространства в данный момент времени. В частности, известно, что если электрон или любая другая система микрочастиц находится в стационарном состоянии с определенной энергией  $E$ , то  $\psi(r, t) = \psi(r) e^{-iEt/\hbar}$  есть решение уравнения Шредингера. Из уравнения Шредингера можно определить энергию таких состояний. Например, энергию электрона, связанного в атоме. Оказалось, что при  $E < 0$  такие решения существуют лишь при определенных выделенных значениях  $E_0, E_1, E_2, \dots$  и все эти значения отрицательны. При этом квадрат модуля волновой функции электрона в атоме определяет вероятность нахождения электрона в том или ином месте внутри атома. Волновая функция свободного электрона отвечает бегущей волне.

Вероятность — величина существенно положительная. Волновая функция — величина комплексная, и, в частности, может принимать отрицательные значения. Для волн вероятности, как и для любых волн, возможна интерференция — сложение волновых функций может как увеличивать, так и уменьшать полную вероятность.

Создание квантовой механики позволило объяснить структуру атома водорода. При переходе к другим атомам возникало математическое осложнение — в многоэлектронных атомах нужно было учитывать не только кулоновское взаимодействие электронов с ядром, но и кулоновское взаимодействие электронов атома между собой. Но это затруднение можно было преодолеть. Более серьезной оказалась проблема описания закономерностей, связанных с периодическим законом Менделеева.

Изучение строения атома показывало, что атом обладает определенной структурой электронных орбит. Казалось бы, наиболее естественным было бы, что все электроны находились в состоянии с минимальной энергией, на ближайшей к ядру электронной орбите. Ведь согласно теории Бора, если бы электрон находился на более далекой орбите, он мог бы, испустив электромагнитный квант, перейти на более близкую к ядру орбиту. Но этого не происходило. Например, у атома лития, обладающего тремя электронами, на ближней орбите находятся только два электрона, а третий обладает более высокой энергией, и тем не менее этот атом стабилен. Электрон с высоко лежащей орбитой на нижний уровень не переходит. И подобными свойствами обладала структура атомов всех остальных более тяжелых, чем литий, элементов. Чтобы объяснить такую сложную структуру заполнения электронных орбит в атомах, Паули предложил принцип запрета: два электрона не могут находиться в одном и том же состоянии. Если они обладают одинаковой энергией, у них должны отличаться другие характеристики. Результаты опытов по изучению поведения атомов в магнитном поле легко объяснялись, если бы электрон обладал собственным вращательным моментом, который называли *спином*. Без учета спина заполнение орбит подчинялось правилу: на каждой орбите не более *двух* электронов. С учетом спина электрона правило Паули формулируется еще

проще: на каждой данной орбите и с данным направлением спина может находиться только один электрон (или ни одного электрона). Спин, т. е. вращение электрона приводит к тому, что электрон ведет себя не только как точечный заряд, но и как маленький круговой ток, т. е. как магнетик.

Магнитные измерения подтверждают именно приведенную выше формулировку принципа Паули: 2 электрона, находящиеся в одном «пространственном» состоянии (на старом языке — на одной орбите) должны иметь спины, направленные в противоположные стороны, и суммарный магнитный момент таких двух электронов равен нулю.

Спин имеет размерность вращательного момента: размерность импульса, помноженную на размерность расстояния, т. е.  $\text{г} \cdot \text{см}^2/\text{с}$ , а это как раз размерность постоянной Планка  $\hbar$ . В квантовой механике вращательный момент  $L$  оказывается целым, кратным  $\hbar$ , причем вращательному моменту  $L$  (в единицах  $\hbar$ ) отвечают  $(2L + 1)$  различных состояний с различными значениями проекции на данную ось. Спин электрона (в единицах  $\hbar$ ) равен  $1/2$  и может иметь две различные проекции  $+1/2$  и  $-1/2$  на данную ось\*). На одном и том же энергетическом уровне электроны обладают различной величиной проекции вращательного момента или направлением спина. Добавляя электроны, мы будем наблюдать заполнение энергетического уровня до тех пор, пока все возможные различия электронных состояний не будут исчерпаны. Если оболочка заполнена и все возможные отличающиеся друг от друга состояния уже заняты, на эту оболочку больше нельзя добавить электроны. Добавление электронов приведет к заполнению следующих более высоколежащих орбит, с которых нельзя перейти на заполненные до отказа низколежащие энергетические уровни.

---

\*) Подчеркнем, что речь идет о проекциях на любую ось. Величина проекций равна  $+1/2$  и  $-1/2$  независимо от направления оси. Иногда условно говорят о состояниях «спин вверх» и «спин вниз». Понятно, что с тем же успехом можно говорить «вправо» — «влево». Число состояний — два — не зависит от этого выбора. Если есть магнитное поле, то оно выделяет эти два состояния: состояние с направлением спина по полю имеет энергию  $+\mu H$  и энергию  $-\mu H$  — против поля. Число состояний (два) имеет чисто квантовую природу и равно числу возможных проекций спина  $s$  на данную ось:  $(2s + 1)$ .

Так принцип Паули позволил объяснить химические свойства элементов, определяемые электронами внешних незаполненных оболочек. Периодичность в заполнении электронных оболочек давала фундаментальное физическое обоснование периодическому закону Менделеева. Принцип Паули позволил объяснить наблюдаемую структуру электронных оболочек атомов, насыщение этих оболочек, отсутствие переходов электронов высоколежащих уровней на низколежащие уровни многоэлектронных атомов \*).

Если на электрон или любую другую квантово-механическую систему оказывается воздействие, то решения уравнения Шредингера дают ответ на вопрос об изменении состояния системы со временем. Ответ оказывается вероятностным: через некоторое время система может с разной вероятностью оказаться в разных состояниях. Решая уравнение Шредингера, можно определить, с какой именно вероятностью система окажется в том или ином состоянии.

Но была в теории Шредингера одна трудность.

Теория относительности требовала одинакового описания явлений во всех инерциальных системах отсчета. Этому требованию уравнение Шредингера не удовлетворяло.

В книге мы уделяем несоответственно мало внимания квантовой механике атомов. Замечательные области — квантовая механика молекул, квантовая химия, теория твердых тел (диэлектриков, полупроводников, металлов) — остаются за рамками нашего повествования. Но невозможно объять необъятное, как сказал еще Козьма Прутков. К тому же развитие квантовой механики в этих областях скорее похоже на повесть о мирной семейной жизни героев, бурно сражавшихся в молодости в той драме идей, которую мы стараемся изложить. Но и идилии имеют своих читателей, которых мы отсылаем к прекрасным книгам

---

\*) Подчеркнем, что принцип Паули — это совсем не электрическое или иное отталкивание электронов. Этот принцип отражает антисимметрию волновых функций электронов, наличие у электронов полупцелого спина. Статистические свойства бозонов ведут к симметрии их волновых функций. Например, два ядра  $^4\text{He}$  описываются симметричной волновой функцией, хотя каждое из них состоит из 4 фермионов, т. е. частиц с полупцелым спином — двух протонов и двух нейтронов. Мы создаем, что эти краткие замечания могут в лучшем случае возбудить интерес к свойствам ядер, атомов и молекул,

Я. И. Френкеля, Л. Де Бройля, Э. В. Шпольского и др.

Мы перескакиваем из эпохи 1905—1912 гг. сразу в 1928 г., хотя именно в 1912—1928 гг. были заложены все основы атомной физики, молекулярной физики, молекулярной биологии. Но наша тема другая.

### Теория Дирака

В 1928 г. молодой английский теоретик П. А. М. Дирак предложил свое квантовое уравнение для описания движения электрона и его взаимодействия с электромагнитным полем, удовлетворяющее теории относительности. В теории атома эффекты теории относительности невелики — существование массивного ядра атома приводит к выделенной системе отсчета, связанной с ядром. Но на основе уравнения Дирака можно было рассчитать и поправки, обусловленные тем, что отношение скорости движения электрона к скорости света не равно нулю. Было у этого уравнения и еще одно преимущество: оно с неизбежностью однозначно требовало существования вполне определенного спина электрона и предсказывало вполне определенную величину его магнитного момента  $\mu$ . Найденное из опыта значение  $\mu$  совпадало с вычисленным с точностью 0,1 %. «Внутреннее вращательное движение» электрически заряженного электрона определяло его магнитное взаимодействие — делало его элементарным магнетиком. Как показал Паули, чтобы учесть это свойство электрона в теории Шредингера, нужно было удвоить число электронных состояний — учесть, что электрон может находиться в двух состояниях: со спином, направленным «вверх» и со спином, направленным «вниз». В теории Дирака существование магнитного момента электрона получалось непосредственно как следствие наличия у электрона электрического заряда и спина. Но число состояний при этом не удваивалось, а учетверялось! Кроме двух состояний с направлением спина «вверх» и «вниз» у электрона предсказывалось еще два точно таких же состояния: «спин вверх» и «спин вниз», но с отрицательной энергией. Возникла проблема состояний с отрицательной энергией.

Ох, и странные должны были быть свойства у этих состояний! Вот хотя бы такое: у этих состояний отри-



цательна полная энергия, включающая энергию покоя ( $E_0 = mc^2$ ), т. е.  $E < -mc^2$  \*).

Чтобы увеличить скорость такого электрона, у него нужно отнять энергию. И наоборот — сообщить энергию, чтобы его остановить. Было очевидно, что такого в Природе не бывает. От состояний с отрицательной энергией надо было избавиться. Из уравнения Дирака состояния с отрицательной энергией предсказывались для свободных, невзаимодействующих частиц. В классической физике от таких состояний избавиться было бы легко. У электрона ненулевая масса, и положительная энергия покоя  $E_0 = mc^2$ . В классической физике энергия меняется непрерывно. Задавшему положительным значением начальной энергии частицы, мы можем при ее непрерывном изменении дойти до величины энергии покоя  $E_0 = mc^2$ , которая никуда деться не может. В классической физике электроны с отрицательной энергией появиться не могли бы, если бы все электроны вначале обладали положительной энергией. Но уравнение Дирака — уравнение квантовое, оно описывает состояния электронов. И между этими состояниями могут происходить квантовые переходы с одного энергетического уровня на другой.

Электроны с положительной энергией должны бы были, таким образом, излучать. Их перескок с испусканием фотона в состояние с отрицательной энергией был бы возможен и как спонтанный (ср. с переходами в атоме), т. е. как самопроизвольный с испусканием фотонов.

Возникла проблема стабильности электронных состояний. И решая проблему состояний с отрицательной энергией, Дирак использовал результаты теории электронных оболочек атома: тут-то и пригодился принцип Паули.

Дирак использовал этот принцип для объяснения отсутствия переходов в состояния с отрицательной энергией. Ведь если переход в эти состояния происходит достаточно быстро, значит он уже давно произошел, значит переход в эти состояния уже невозможен.

---

\*) Введем величину  $m_0 = 9,8 \cdot 10^{-28}$  г, которая всегда положительна. Тогда окажется, что  $m = \pm \sqrt{m_0^2} = \pm m_0$ . Масса обычного электрона положительна. Масса нового странного состояния отрицательна.

Бесконечный резервуар состояний с отрицательной энергией заполнен бесконечным числом электронов. Избыточные электроны, которые уже не могли в него вместиться, поневоле оказываются электронами с положительной энергией. Это и есть те электроны, с которыми мы имеем дело в окружающем нас мире.

В теории Дирака даже совсем пустое пространство — совсем не пустое, что само по себе поразительно. Оно представляет собой *море электронов с отрицательной энергией* и бесконечной плотностью. Дирак предположил, что само это море ненаблюдаемо. Оно составляет однородный фон, не оказывающий влияния на протекание электромагнитных процессов. Но *изменения состояния моря*, «возмущения» его могли бы наблюдаться. Аналогия с заполнением электронных оболочек атомов указывала, что возможен процесс, аналогичный фотоэффекту. Электромагнитный квант с энергией, превышающей энергию связи электрона в атоме, может выбить электрон из атома: получаются свободный отрицательно заряженный электрон и положительно заряженный ион. Если же энергия кванта превышает  $2mc^2$ , то электрон с отрицательной энергией мог бы перейти в состояние с положительной энергией и наблюдаться как свободный электрон. Но в море отрицательно заряженных электронов при этом появилась бы «дырка»<sup>\*)</sup>. По предположению Дирака полный бесконечный заряд электронного моря с отрицательной энергией не наблюдаем, но вырывание из моря электрона оставляло море незаполненным на один электрон. После выбивания электрона с зарядом  $(-e)$  заряд моря становился равным  $(-\infty) - (-e) = (-\infty) + e$ . Бесконечный отрицательный заряд моря ненаблюдаем, но в море появилось состояние «дырки» с зарядом  $+e$ . Появилась возможность рождения пары: электрон  $+$   $+$  «дырка». Возможность рождения обычного электрона и «дырки» — состояния с положительным электрическим зарядом. Это сейчас мы так легко говорим: «рождение пары». А какую сложную конструкцию: море электронов с ненаблюдаемым бесконечным отрицательным зарядом — придумал Дирак, чтобы этих слов избежать!

<sup>\*)</sup> Сравните с «дырочной» проводимостью полупроводников — недостающие электроны в них эквивалентны «дыркам» с положительным зарядом.

## «Ядерные электроны»

В своей блестящей работе «18 брюмера Луи Бонапарта» Карл Маркс пишет: «История повторяется первый раз в виде трагедии, второй раз в виде фарса. Новое всегда рядится в старые одежды». История физики конца 20-х гг. дает тому яркие примеры. Старое представление о неуничтожимых и несотворимых частицах заставляло творцов новой физики облачать свои идеи в весьма причудливую форму. Одну такую конструкцию — море Дирака — мы только что обсудили. Другой пример — теория строения атомного ядра, выдвигавшаяся в то время.

Можно было объяснить  $\alpha$ -радиоактивность вылетом из радиоактивного ядра  $\alpha$ -частицы, т. е. вылетом комплекса из двух нейтронов и двух протонов, которые раньше существовали в ядре. В случае  $\beta$ -радиоактивности такое представление приводило к тяжелому противоречию. В духе этого представления следовало считать, что вылетающие из ядра  $\beta$ -частицы — электроны до распада должны были находиться в ядре. Существование электронов в ядре требовалось и теорией структуры ядра. Еще в 1814 г. Проут высказал догадку о существовании *протона* — частицы, определяющей массу атома. Эта гипотеза объясняла, почему массы ядер кратны целым числам\*). Итак, согласно Проуту ядро состоит из протонов. Их суммарная масса и есть масса ядра, т. е. с точностью до дефекта массы, обусловленного энергией связи составляющих ядра, равна сумме масс протонов. После открытия протона эта гипотеза получила и экспериментальное подтверждение. Но для всех ядер (кроме ядра водорода — самого протона) сумма зарядов протонов, составляющих ядро, оказывалась больше, чем заряд ядра, равный числу электронов атома. Заряд части протонов должен был быть как-то скомпенсирован. Предполагалось, что  $\beta$ -частицы, т. е. электроны, должны находиться в ядре и компенсировать

---

\*) Заметим, что гипотеза Проута получила подтверждение, когда были открыты изотопы. Так, например, атомная масса хлора 35,5 сильно отличалась от целого числа — однако, оказалось, что хлор состоит из двух изотопов, одного с атомным числом 37 и другого 35. Для отдельных изотопов отличие атомной массы от целого числа мало, гораздо меньше, чем у средней атомной массы.

своими отрицательными зарядами положительные заряды избыточных протонов. Но тут же — после создания квантовой механики — возникла проблема: легкие электроны должны были быть локализованы в малом объеме ядра. Принцип неопределенности приводил при такой локализации электронов к столь большой неопределенности их импульса, что становилось совсем непонятно, как при таких больших импульсах электроны вообще остаются в ядре. Проблема ядерных электронов становилась катастрофической. Возникла и другая неразрешимая проблема, менее яркая для специалиста, но столь же острая. Можно определить спин ядра. Он будет складываться из спинов и вращательных моментов отдельных составляющих ядра. Вращательный момент в единицах  $\hbar$  всегда целое число, а сумма спинов составляющих со спином  $1/2$  (в единицах  $\hbar$ ) будет целым или полуцелым числом в зависимости от того, четным или нечетным является число составляющих.

Таким образом, спин ядра является целым или полуцелым числом в единицах  $\hbar$  в зависимости от четности числа составляющих.

У ядра азота атомная масса 14. Это ядро должно состоять из 14 протонов. Заряд ядра атома 7. Заряд 7 из 14 протонов должен быть скомпенсирован 7 электронами, которые также должны входить в состав ядра. Поэтому в ядро азота должны входить 7 электронов и 14 протонов. Итого 21 частица. Число составляющих нечетное, поэтому спин ядра азота должен был быть полуцелым. А опыты указывали, что этот спин целочисленный. Возникла «азотная катастрофа».

Еще в 1920 г., обсуждая в своей лекции в Королевском обществе гипотезу о наличии электрона в составе ядра, Резерфорд высказывал мысль о возможности существования «атома» с массой равной единице и зарядом ядра равным нулю. В духе гипотезы «ядерных электронов» такое образование представлялось вполне возможным. Раз электроны в ядре атома компенсируют заряд части протонов ядра, почему не быть полной компенсации?

В том же 1920 г. гипотезу о существовании такого «Н-атома» высказали Харкинс в США и Мэссон в Австрии. Вскоре появился и термин «нейтрон» для обозначения электрически нейтральной системы связанных в ядре протона и электрона. Ясно, что су-

существование такой системы не спасло бы от азотной катастрофы, так как ее полный спин был бы целочисленный. Но неправильная идея об «Н-атоме» (о нейтроне с целочисленным спином) стимулировала его поиск и привела к открытию настоящего нейтрона. Этот нейтрон в чем-то похож на «Н-атом», но во многом от него отличается: он — элементарная частица со спином  $1/2$ .

Ученик Резерфорда Чедвик предложил искать «нейтроны», образующиеся при бомбардировке  $\alpha$ -частицами ядер алюминия. В 1929 г. Резерфорд вместе с Чедвиком предпринял попытку экспериментального обнаружения нейтрона.

Открытие нейтрона датируют 1932 годом, хотя наблюдался нейтрон и раньше. В 1930 г. Боте и Беккер в Германии обнаружили необычайно жесткое проникающее излучение \*), образующееся при бомбардировке бериллия  $\alpha$ -частицами. Они приписали эффект  $\gamma$ -излучению высокой энергии. В 1931, 1932 гг. Ирен и Фредерик Жолио-Кюри исследовали это проникающее излучение и установили, что его взаимодействие с водородсодержащим веществом приводит к появлению протонов высокой энергии. Если бы это было  $\gamma$ -излучение, то протоны такой высокой энергии не могли бы образоваться. Жолио-Кюри предполагал, что открыт новый вид взаимодействия магнитного поля с веществом. Но Чедвик интерпретировал результаты их опытов иначе: «Эти экспериментальные результаты очень трудно объяснить на основании гипотезы, что излучение бериллия представляет собой квантовое \*\*) излучение, но они непосредственно вытекают из предположения, что излучение состоит из частиц, которые имеют массу, приблизительно равную массе протона, но не имеют заряда». Оценка массы нейтрона подтверждалась измерениями пробега выбиваемых нейтронами протонов.

«Если бы мы с женой читали лекцию Резерфорда 1920 г., то вероятно, сами бы идентифицировали нейтрон», — отмечал впоследствии Фредерик Жолио. По-

---

\*) Жестким называли излучение, почти без ослабления проходившее через слой свинца в несколько миллиметров толщиной. Так характеризовали в начале века энергию («жесткость») рентгеновского излучения и еще более энергичных фотонов — гамма-излучения.

\*\*) Речь идет об электромагнитных квантах.

мимо непосредственно наблюдения нового явления необходима была психологическая готовность его воспринять.

Необходимо было и общее физическое чутье к перспективам, которые новое явление открывало. О том, что А. Ф. Иоффе обладал таким чутьем, свидетельствует резолюция семинара, состоявшегося в Физико-техническом институте по получении телеграммы от Чедвика об открытии нейтрона. Эта резолюция нашла отражение в телеграмме, посланной Чедвику, что коллектив ФТИ, возглавляемый А. Ф. Иоффе, включается в исследования физики нейтронов. Иоффе, не занимавшийся лично частицами и ядром, проявил огромную интуицию и почувствовал общечеловеческое значение открытия нейтрона.

Нейтроны не нуждаются в преодолении кулоновского энергетического барьера для осуществления ядерных реакций. Поэтому, именно открытие нейтронов заложило основу атомной энергетики со всеми ее великими и ужасными следствиями. Это открытие радикально изменило творческую биографию и личную судьбу многих физиков.

### Нейтрино

К началу 30-х гг. в физике возникла серьезная проблема, связанная с испусканием электронов при  $\beta$ -распаде. В этом процессе наблюдалось постоянное нарушение закона сохранения энергии: энергия электронов не была фиксированной, равной разности энергий покоя начального и конечного ядер  $E_{\text{max}}$ . В пределах от  $E_0 = mc^2$  до максимального значения  $E_{\text{max}}$  вылетающие электроны обладали самыми разными значениями энергий — наблюдался непрерывный спектр энергий этих частиц. Это было совсем удивительно, особенно после того, как установили, что уменьшение энергии электронов по сравнению с ожидаемой величиной нельзя приписать взаимодействию электронов с электронами атома. Возникла проблема несохранения энергии в  $\beta$ -распаде.

Из закона сохранения энергии следовало, что электроны должны вылетать со строго определенной энергией, равной разности энергий покоя начального и конечного ядер. На опыте электроны никогда не обладали этой энергией, наблюдался непрерывный

энергетический спектр электронов. Н. Бор и Х. А. Крамерс в этой связи вообще обсуждали возможность того, что в микромире закон сохранения энергии не справедлив, т. е. что энергия сохраняется только в среднем.

Другое решение предложил В. Паули в своем шутиливом письме геттингенским физикам, датированном 6 декабря 1930 г., вперемешку с сожалениями по поводу своего отсутствия на конференции, на которую он никак не может поехать — очень уж интересные балы ожидаются у них в эти дни в Цюрихе. Само содержание письма наверняка требовало такого легкомысленного обрамления. Паули предлагал новую частицу, спасающую от несохранения энергии в  $\beta$ -распаде. Он предположил, что существуют легкие нейтральные частицы, вылетающие вместе с электронами при  $\beta$ -распаде и уносящие недостающую энергию. Полная энергия, выделяемая при  $\beta$ -распаде, в этом случае практически никогда не может перейти к электронам. Часть этой энергии наверняка унесут гипотетические частицы. Масса частицы, предложенной Паули, не должна была существенно превышать массу электрона. Это следовало и из опытов по  $\beta$ -распаду и из измерения масс ядер. Не очень серьезное отношение Паули к собственной идее определялось, по-видимому, тем, что он привлекал новую, трудно наблюдаемую частицу для решения имевшихся трудностей. «Я сделал сегодня что-то ужасное. Физику-теоретика никогда не следует делать ничего такого. Я предложил нечто, что никогда нельзя будет проверить экспериментально», — так сам Паули комментировал свою идею.

Предлагая новую проникающую частицу — *нейтрино*, Паули уверенно заключал пари, что ее существование никогда не будет проверено. Двадцать пять лет спустя ему пришлось признать, что пари проиграно. В мощных пучках нейтрино от ядерных реакторов \*) и ускорителей стало возможно наблюдать реакции взаимодействия нейтрино. Нейтринная физика заняла прочное место в современной физике элементарных частиц. Развита нейтринная астрофизика и нейтринная астрономия. Нейтринные телескопы на-

---

\*) Сам процесс деления ядер урана в реакторе не дает нейтрино, однако образующиеся ядра-осколки радиоактивны; именно с этой радиоактивностью связаны и биологическая опасность деления, и испускание нейтрино,

строены на поиск невидимых астрономам процессов в глубинах Вселенной и в недрах звезд. Без решающей роли нейтринных процессов теоретическая астрофизика не мыслит конечной судьбы звезд. Со свойствами нейтрино связывают наблюдаемое распределение галактик и невидимую массу Вселенной. А ведь немногим более 50 лет назад все это казалось немалым самому Паули.

### Позитрон

Психологический барьер преодолеть трудно. Встреча с новым явлением прежде всего вызывает желание интерпретировать его в рамках привычных понятий. Это своеобразная экономия терминов, экономия представлений. Это разумный консерватизм. В истории физики он часто помогал развитию науки. Но после первого периода рождения идей его приходилось преодолевать для дальнейшего движения вперед.

Предложив свою интерпретацию состояний электронов с отрицательной энергией, выдвинув гипотезу о «дырках» в море таких состояний, П. А. М. Дирак также следовал «принципу экономии»: «Незаполненные состояния с отрицательной энергией представятся нам как нечто с положительной энергией потому, что для того чтобы оно исчезло, т. е. заполнилось, необходимо внести туда один электрон с отрицательной энергией. Мы предполагаем, что эти незаполненные состояния с отрицательной энергией суть протоны». Экономия естественная. Единственная известная положительно заряженная частица — протон. Экономия требовала отождествить состояния положительно заряженных частиц с состояниями протона. Но масса протона почти в две тысячи раз превышает массу электрона. Такое отождествление не представлялось удовлетворительным, поскольку в теории была установлена строгая симметрия состояния «дырок» и электронов — они должны были обладать одинаковой массой. Более того, теоретики указывали на фундаментальную трудность отождествления протона и «дырки» — нестабильность атома. Из теории Дирака следовало, что при столкновении электрона и «дырки» должна была происходить их аннигиляция — превращение в пару жестких  $\gamma$ -квантов. Отождествление



«дырок» с протонами было несовместимо со стабильностью материи относительно такой аннигиляции: электрон и протон в атоме водорода не аннигилируют. И в 1931 г. Дирак формулирует свое замечательное предсказание: ««Дырка», если бы она существовала, была бы частицей нового сорта, неизвестной в экспериментальной физике. Поскольку у этой частицы была бы масса электрона, а заряд положительного знака, мы можем назвать эту частицу антиэлектрон. Поскольку антиэлектроны быстро аннигилируют с электронами, не следует ожидать, что такую такую частицу легко обнаружить. Но если эти частицы создавать экспериментально в высоком вакууме, они будут достаточно стабильны и их можно будет наблюдать».

По высказанной точке зрения, протоны никак не связаны с электронами. Можно предположить, что протоны имеют свои собственные состояния с отрицательной энергией, которые обычно все заполнены. Незаполненное состояние с отрицательной энергией будет эквивалентно антипротону. Теоретически совершенно непонятно, почему должна существовать какая-либо разница между случаем протонов и случаем электронов».

В начале века ускорителей не было. Первыми ускорителями были рентгеновские трубки с энергией электронов до 50—100 кэВ. Исследования велись с помощью естественных природных источников частиц высокой энергии. Это — радиоактивные ядра, использовавшиеся школой Резерфорда. Но был и другой источник — космические лучи.

Космические лучи были открыты в 1910 г. Они интенсивно изучались физиками разных стран. В 1928—1929 гг. Д. В. Скобельцын провел свои исследования с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле. В полученных им снимках наблюдались аномалии, но эти аномалии не получили определенной интерпретации. В 1932 г. Андерсен в США, применив более мощное поле, обнаружил следы частицы, отклонявшейся в магнитном поле подобно электрону, но в противоположную сторону. Частицы отклонялись как электроны с положительным зарядом, т. е. как антиэлектроны — *позитроны*. Отказ Дирака от экономии на числе различных типов частиц оказался плодотворным.

## Элементарные частицы

«Год великих открытий» — 1932 год — завершил поворот в представлении об элементарных частицах.

«Экономные» схемы строения микромира не выдерживали экспериментальной проверки. Число элементарных частиц расширилось. Каждой частице должна была соответствовать еще и своя античастица.

Открытие *нейтрона* означало открытие новой элементарной частицы. Такой же элементарной, как и протон. К этому выводу пришли в 1932 г. В. Гейзенберг в Германии и Е. Н. Гапон и Д. Д. Иваненко в СССР. Итак, нейтрон входит в состав ядра. В ядрах нет «избыточных протонов» и ядерных электронов. Ядро с зарядом  $Z$  и массовым числом  $A$  состоит из двух типов элементарных частиц: из  $Z$  протонов и  $(A - Z)$  нейтронов. Сама по себе такая замена еще не меняла традиционных представлений об элементарности. Менялись кирпичики — не принцип построения здания. Но применительно к  $\beta$ -распаду такая простая замена составляющих ядра содержала принципиально новый элемент. Электроны и нейтрино в ядре не содержатся, тогда в процессе  $\beta$ -распада должны рождаться пары  $\beta$ -частица—нейтрино подобно тому, как рождаются  $\gamma$ -кванты при  $\gamma$ -распаде. Исходя из этой аналогии, Энрико Ферми в 1934 г. предлагает теорию  $\beta$ -распада, согласно которой в ядре находятся протоны и нейтроны. В процессе  $\beta^+$ -распада ядра протон превращается в нейтрон, а в процессе  $\beta^-$ -распада нейтрон превращается в протон \*). При этом рождаются

---

\*) Свободный протон стабилен, а свободный нейтрон нестабилен и распадается на протон, электрон и антинейтрино. Распад нейтрона и стабильность протона следуют из того, что масса, а значит, и энергия нейтрона на 0,13 % больше массы протона, на 0,08 % больше суммы масс протона и электрона, так что еще остается избыток на энергию нейтрино и электрона. Распад свободного протона невозможен энергетически, масса протона меньше минимальной суммарной массы нейтрона, позитрона и нейтрино. Однако действие ядерных сил может привести к тому, что энергия связанного в ядре протона окажется больше, чем энергия связанного нейтрона. Тогда связанный в ядре протон становится нестабильным относительно распада на связанный в ядре нейтрон, позитрон и нейтрино. Например, ядро  $^{13}\text{N}$  (которое можно представить как систему  $^{12}\text{C} + p$ ) нестабильно относительно распада на ядро  $^{13}\text{C}$  (система  $^{12}\text{C} + p$ ), позитрон и нейтрино. При этом связанный в  $^{13}\text{N}$  протон неста-

позитрон (или электрон) вместе с частицей Паули — нейтрино.

После открытия нейтрона «азотная катастрофа» больше не страшила. Массовое число 14 и заряд ядра 7 просто означали, что в ядре азота 7 протонов и  $14 - 7 = 7$  нейтронов. Спин нейтрона тоже  $1/2$ . В ядре азота четное (14) число составляющих, и его спин должен быть целочисленным.

Концепция «элементарной частицы» как неизменной неуничтожаемой составляющей материи терпела крах. Электрон мог рождаться в  $\beta$ -распаде. Электрон мог уничтожаться: в паре с позитроном он мог аннигилировать в  $\gamma$ -кванты, в  $K$ -захвате атомный электрон мог захватываться ядром, уменьшая на единицу заряд и рождая нейтрино. В опытах с космическими лучами наблюдалось рождение пар: электрона и позитрона. Возникало представление о частицах, которые могут рождаться и уничтожаться. Частицы поля — фотоны и частицы материи — электроны могли превращаться друг в друга\*). Оказалось, что электрон не вечен. Он может рождаться и уничтожаться так же, как может рождаться фотон. Однако фотоны могут рождаться и поглощаться поодиночке, а электроны — нет. Или в паре с позитроном, или в паре с протоном. Отдельный электрон без сопровождения не рождается. Этому препятствует закон сохранения заряда.

Типы частиц множились. Частицы могли рождаться и уничтожаться. Но сквозь их превращение проступал новый уровень законов сохранения. Новый уровень понятий, на котором сохранилось представление о неизменных формах бытия. О формах, неподвластных рождению или уничтожению. На смену «вечным частицам» в физику приходят «вечные заряды».

билен, а нейтрон, связанный в  $^{13}\text{C}$ , стабилен. Эти выводы можно получить как на языке эффективных масс нуклонов в ядрах (с учетом энергии связи нуклона в ядре), так и прямо исходя из масс этих ядер, поскольку масса ядра учитывает энергию связи нуклонов.

\*) В популярной литературе иногда встречались замечания, что аннигиляция *двух* частиц (электрона и позитрона) ведет к рождению тоже *двух* частиц (двух фотонов). Из этого факта выводился «фундаментальный» закон сохранения  $2 = 2$ . В действительности такого закона нет. В некоторых условиях одиночный  $\gamma$ -квант рождает пару  $e^+e^-$ , а при аннигиляции образуются не два, а три  $\gamma$ -кванта. Поэтому действительные законы сохранения в аннигиляции иные (см. далее).

Так в начале 30-х гг. в физику приходит целый ряд новых идей, определивших развитие теоретической физики последующего пятидесятилетия. Эти идеи (во всяком случае существенная их часть) лежат в основе современной теории микромира.

### Рождение и уничтожение частиц

Теория Дирака позволяла описать все электромагнитные квантовые процессы. Она предсказала существование позитрона и правильно описала его физические свойства. На ее основе можно было изучать и переходы электронов в атоме, и процессы взаимодействия электронов и позитронов. Теория предсказала поведение электронов и позитронов в полном согласии с опытом. Подчеркнем, что теория и переходов электронов с одного уровня на другой в атоме, и перехода с  $E < -mc^2$  на уровень с  $E > mc^2$  была одной и той же. Гипотеза о *море Дирака* обеспечивала единство такого описания, фактически основанного на представлении о вечном неуничтожимом электроне. Но предсказание процессов аннигиляции электронов и позитронов, процессов рождения пар закладывали новую концепцию: взаимодействие, сводившееся по первоначальному смыслу к изменению траектории, обретало смысл рождения и гибели частиц. Можно было перевести язык теории Дирака на новый язык этой концепции. Этот язык реализован в квантовой теории поля, основанной на представлении о возможности рождения и уничтожения частиц.

Квантовая теория поля по-новому осмыслила представление о *море Дирака*. Допустив возможность рождения и уничтожения частиц, можно отказаться от резервуара электронов с отрицательной энергией. Состояние электрона с отрицательной энергией есть состояние позитрона с положительной энергией. Мир квантовой теории поля — не набитое до отказа неуничтожимыми электронами «море» состояний с отрицательной энергией. В ее основе лежит вакуум, способный рождать и поглощать электроны и позитроны. На старом языке (в теории моря Дирака) речь шла о процессах выбивания электронов из «моря». Получались электрон и «дырка»,

На новом языке речь идет о процессах рождения из вакуума пары электрон — позитрон.

В теории Дирака говорилось о заполнении незанятого состояния с отрицательной энергией электроном с положительной энергией. Заполняя состояние «дырки» в «море», электрон должен испускать  $\gamma$ -кванты.

На новом языке речь идет об аннигиляции электрона и позитрона в  $\gamma$ -кванты.

Картина квантовой теории поля основана на представлении о рождении и уничтожении электронов и позитронов. В этой картине нет нужды следить за тем, как неуничтожимый и несотворимый электрон прячется в море состояний с отрицательной энергией, как он выбивается из этого состояния, оставляя дырку в море, и становится свободным электроном с положительной энергией, как, повстречав незанятое состояние в море, он переходит в это состояние, испуская  $\gamma$ -кванты. Во всех этих парадоксальных картинах нет более надобности, коль скоро мы отказываемся от вечной и неуничтожимой элементарной частицы.

Зпасывая по-новому (на языке рождения и уничтожения) уравнения для электронов и позитронов, мы приходим к новой картине фона, на которой происходят процессы рождения и уничтожения. Этот фон — вакуум.

В основе теории Дирака лежало полностью заполненное электронами море состояний с отрицательной энергией.

В основе квантовой теории поля — состояние вакуума, в котором частицы вообще отсутствуют.

В теории Дирака электрон и позитрон были равноправны: позитрон является «дыркой» в море Дирака. Реальная частица теории Дирака — электрон, позитрон — частица «эффективная»: она — эффект отсутствия электрона. Поэтому и основное состояние теории Дирака — ненаблюдаемое море электронов с бесконечным отрицательным зарядом. Зарядовая симметрия — симметрия частиц и античастиц — появлялась в этой теории эффективно — за вычетом ненаблюдаемых эффектов «моря».

Квантовая теория поля зарядово симметрична. Электрон и позитрон в этой теории — частицы равно-

правные. И физический вакуум теории электрически нейтрален.

Такое построение теории более адекватно Природе. Ведь законы электромагнетизма зарядово симметричны, и возможна такая трактовка теории Дирака, когда позитроны являются частицами, а электроны — «дырками». Окружающая нас Вселенная зарядово асимметрична, в ней существенно меньше позитронов — но это асимметрия реализации начального состояния, о чем мы еще поговорим.

Язык квантовой теории поля — это язык превращения частиц. В соответствии с этим понятия «ток» и «заряд» должны быть переформулированы. Для «вечного» электрона заряд — это свойство, которое ему внутренне присуще. Заряд «вечен», потому что «вечен» электрон, как и другие заряженные частицы (протон!) — такой была старая точка зрения.

Новая точка зрения иная. Согласно квантовой теории поля, могут происходить квантовые превращения: одни частицы могут уничтожаться, другие — рождаться, и заряд связывается не с отдельными частицами, а со всей совокупностью частиц. То, что на языке не уничтожимых частиц было бы внутренним свойством этих частиц, на языке квантовой теории поля есть свойство превращений частиц.

Мы принимаем новый язык потому, что рассматриваем его как эквивалентный старому, сохраняющий все его правильные количественные результаты расчетов квантовых переходов. Только теперь вместо старого «переход электрона (предсуществующего) из состояния с отрицательной энергией в состояние с положительной энергией» мы говорим «рождение пары электрон—позитрон».

Но, когда мы уже выучили новый язык и говорим: «может родиться пара  $e^+e^-$ », нам кажется вполне естественным и мы не удивляемся тому, что может родиться пара  $e^-\bar{\nu}$  или  $e^+\nu$  (здесь  $\bar{\nu}$  — антинейтрино). Только очевидно, что в этом случае родить ее должен «заряженный фотон»  $W^- \rightarrow e^-\bar{\nu}$  или  $W^+ \rightarrow e^+\nu$ . А источником такого заряженного фотона, например  $W^-$ , должно быть превращение электрона в нейтрино или нейтрона в протон. Так новый язык позволяет естественным образом обобщить описание электромагнитного взаимодействия на случай других превращений элементарных частиц.

На новом языке процессы взаимодействия частиц становятся процессами рождения и уничтожения квантов поля взаимодействия. Любой процесс взаимодействия двух частиц оказывается процессом обмена таким квантом между этими частицами. В этом смысле процессы электромагнитного взаимодействия сводятся к процессам обмена электромагнитными квантами.

Здесь важно подчеркнуть различие между реальными фотонами и электромагнитными квантами, рождаемыми в процессе электромагнитного взаимодействия. Реальный фотон — квант электромагнитной волны — обладает только поперечной поляризацией (см. Математическое дополнение, с. 230). Электромагнитные кванты, рождаемые и поглощаемые заряженными частицами в процессе электромагнитного взаимодействия, могут иметь и продольную поляризацию, а могут вообще описываться временной компонентой 4-вектора (т. е. не обладать поляризацией в пространстве). Дело в том, что обменные кванты — это не реальные, а *виртуальные* частицы, для которых связь между энергией и импульсом, а также поляризационные свойства отличаются от реальных частиц. Поэтому, например, кулоновское взаимодействие можно описывать на новом языке как обмен виртуальными электромагнитными квантами, но не фотонами. Эти виртуальные кванты — двоюродные братья фотонов. Более подробно о виртуальных частицах можно прочитать в книгах Л. Б. Окуня « $\alpha\beta\gamma \dots Z$ » или А. Б. Мигдала «Поиски истины».

Хоть простота приятней людям,  
Но сложное доступней им.

*Б. Пастернак*

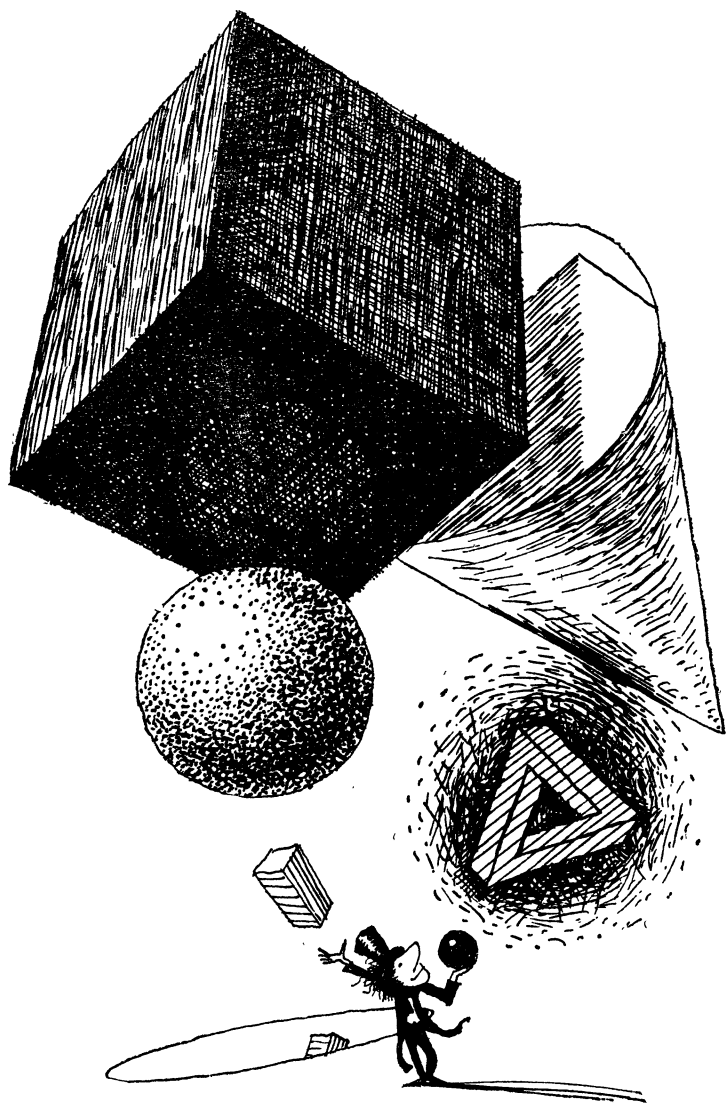
### Симметрия нейтрона и протона

Современная теория рассматривает протон и нейтрон как сложные объекты, состоящие из «более элементарных» составляющих — *кварков*. Именно свойства кварков и их взаимодействий определяют в конечном счете наблюдаемые свойства протона и нейтрона и их превращений. Только переход к кварковому уровню строения материи позволил выявить единство в описании всех фундаментальных сил природы. Но о кварках будет сказано позже, а исторически первым шагом на пути к такому единству стала попытка единого описания свойств протона и нейтрона.

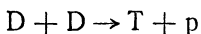
Нейтрон и протон — различные частицы. У протона есть электрический заряд, у нейтрона его нет. Но во всем остальном эти частицы схожи. Эти частицы имеют спин  $1/2$ . У них близкие массы. И та и другая частица входит в состав ядра. Наблюдаются пары так называемых «зеркальных ядер». Это два разных ядра с одним и тем же полным числом нейтронов и протонов, но число нейтронов одного ядра равно числу протонов второго. (Примеры этих пар ядер:  ${}^3\text{H} - {}^3\text{He}$ ,  ${}^{14}\text{C} - {}^{14}\text{O}$ .) У таких разных ядер оказывается очень много общих свойств. Это указывает на сходство сил, действующих на нейтроны и протоны в ядре, и наводит на мысль, что эти частицы в ядре во многом взаимозаменяемы.

Они и в самом деле взаимозаменяемы, что наблюдается в симметрии ядерных реакций, отличающихся заменой нейтрона и протона. Например, ядро  ${}^3\text{He}$  (состоящее из двух протонов и нейтронов) отличается от ядра  $\text{T} \equiv {}^3\text{H}$  (состоящего из двух нейтронов и протонов) заменой нейтронов и протонов. Эти ядра — зер-

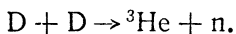




кальные. И в ядерных реакциях их образования наблюдается много сходных черт. Так, очень схожи реакции



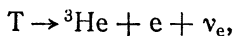
и



Более того, наблюдается и симметрия  $\beta$ -распадов зеркальных ядер. В зависимости от энергии возможны либо  $\beta^+$ -, либо  $\beta^-$ -распады. В первом случае в ядре происходит превращение  $p \rightarrow n$ , во втором  $n \rightarrow p$ . В этих превращениях также наблюдается определенная симметрия. Например, в распадах  ${}^{12}\text{B}$  и  ${}^{12}\text{N}$ :



Однако полной симметрии все же нет. Наблюдают распад



а ядро  ${}^3\text{He}$  стабильно и в ядро трития  $T$  не превращается. Наблюдают распад свободного нейтрона  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ , но не распад свободного протона. Это нарушение симметрии связано с тем, что свободный нейтрон немного тяжелее свободного протона. Поэтому, например, ядро  $T$  (состоящее из двух нейтронов и одного протона) чуть тяжелее ядра  ${}^3\text{He}$ , состоящего из одного нейтрона и двух протонов.

Есть также различие в электрическом заряде нейтрона и протона. Оно вызывает различие в действующих на протон и нейтрон силах. На протон дополнительно действует еще и кулоновская сила, а на нейтрон — нет.

В смысле ядерного взаимодействия протон и нейтрон ведут себя как одна и та же частица. Удобно считать их одной и той же частицей ядра — *нуклоном* (от латинского *nucleus* — «нуклеус» — ядро), но в разных зарядовых состояниях.

Нуклон в состоянии с электрическим зарядом  $+1$  мы называем протоном, а нуклон в состоянии с электрическим зарядом  $0$  — нейтроном.

Возникает аналогия. У электрона два разных спинных состояния: состояние с направлением спина вниз и состояние с направлением спина вверх (или вправо и влево, см. выше). Это одна и та же частица — электрон. Но у нее два разных состояния. По этой аналогии мы можем сказать, что есть одна и та

же частица — нуклон — и у нее два разных состояния, подобных двум разным *спиновым состояниям*. Спиновые состояния — это состояния с различным направлением спина в обычном пространстве. У нуклона разные *зарядовые состояния*, будем называть их состояниями с разными направлениями спина в зарядовом пространстве.

То, что мы называли протоном, есть состояние нуклона со спином вверх в зарядовом пространстве. То что мы называли нейтроном — состояние нуклона со спином вниз в этом пространстве.

Для спина в зарядовом пространстве было придумано неудачное название *изотопический спин*. Неудачное потому, что напоминает про изотопы — ядра с одинаковым зарядом и разными массовыми числами (разным числом нуклонов). В действительности протон и нейтрон — простейший пример так называемых изобар — ядер с одинаковым массовым числом, но разными зарядами. Чтобы избежать неудачной аналогии с изотопами, изотопический спин называют сокращенно «изоспин». Можно было бы говорить «изобарический спин», но это слово сочетание не привилось.

Гипотеза об изоспине снова приводила к экономии в числе независимых частиц. До открытия нейтрона была только одна элементарная частица ядра — протон. Но оказалось, что есть две равно фундаментальные частицы ядра — протон и нейтрон. Если же ввести изоспин, мы снова остаемся с одной элементарной частицей ядра — нуклоном. Просто у нуклона два разных изоспиновых состояния, состояние «изоспин вверх», которое было обнаружено первым и названо протоном, и состояние «изоспин вниз», которое нашли только в 1932 г. и называли нейтроном.

В отсутствие магнитного поля у электрона имеются два разных спиновых состояния, но мы не знаем, в каком именно состоянии он находится — он может находиться в одном состоянии, а может и в другом. У электрона появляется *спиновая степень свободы*.

Так и у нуклона, не учитывая разности масс протона и нейтрона и не включая электрического поля, нельзя сказать, в каком именно «изоспиновом» состоянии он находится. Нельзя сказать, протон это или нейтрон. У нуклона имеется *изоспиновая степень свободы*.

Изоспиновая симметрия приближенная: массы нейтрона и протона отличаются на 0,13 %. Наличие электрического заряда у протона нарушает симметрию энергии в нуклонных системах с несколькими протонами.

Важнейшую роль изоспин (как и спин электрона в строении атома и в химии) играет при применении принципа Паули.

На одной и той же орбите атома могут находиться два электрона с полностью скомпенсированными спинами. Суммарный спин их должен быть строго равен нулю, независимо от того, как они направлены:  $\uparrow\downarrow$  или  $\rightleftharpoons$ , принцип Паули требует, чтобы направления спинов электронов были противоположными.

Аналогично в случае изоспина происходит заполнение ядерных оболочек. Только здесь, помимо спиновой степени свободы в «обычном» пространстве, появляется еще и изоспин, т. е. изоспиновая степень свободы в зарядовом пространстве. На одном и том же энергетическом уровне ядра два нуклона могут находиться только с полным спином или изоспином равными нулю. Поэтому принцип замены нейтрона на протон ограничен принципом Паули.

Полное число различных состояний нуклона равно 4 (2 различных спиновых и 2 различных изоспиновых состояния). Ядерная система, в которой заполнены все эти четыре состояния, максимально упакована и обладает наибольшей энергией связи, приходящейся на нуклон. Такой системой, в которой все нуклоны находятся в основном энергетическом состоянии, является ядро  ${}^4\text{He}$  —  $\alpha$ -частица.

Переворот спина электрона в обычном пространстве есть квантовый переход из состояния со спином вниз в состояние со спином вверх (рис. 9). Переворот изоспина нуклона в зарядовом пространстве — это квантовый переход нуклона на состояния «изоспин вниз» в состояние «изоспин вверх». Нуклоны в состоянии «изоспин вниз» — это нейтроны; в состоянии «изоспин вверх» — протоны. Переворот изоспина нуклона — это превращение нейтрона в протон.

На языке квантовой теории поля переворот спина электрона есть процесс, в котором электрон в состоянии «спин вниз» уничтожается, а электрон в состоянии «спин вверх» рождается. Это превращение может происходить, например, в электромагнитном поле.

При таком переходе может рождаться электромагнитный квант.

Перевороту изоспина нуклона — уничтожению нейтрона и рождению протона тоже можно сопоставить какое-то поле. Поле взаимодействия, вызывающего такое превращение.

Переворот спина электрона отвечает взаимодействию с квантом электромагнитного поля. В этом квантовом переходе электрический заряд частицы, испытывающий квантовое превращение, не меняется: был электрон и остался электрон. Квант электромагнитного поля взаимодействует с зарядом, но сам заряда не несет. Электромагнитный квант — электрически нейтральная частица. Поле, соответствующее электромагнитным квантам, само электронейтрально.

При перевороте изоспина нуклона его заряд меняется: был электрически нейтральный нуклон, остался положительно заряженный протон. И родился квант поля, связанного с таким превращением. Квант, который уносит отрицательный электрический заряд. Поле, связанное с превращением нейтрона в протон, электрически заряженное. Его кванты несут электрический заряд. Это совсем другое поле, в чем-то похожее на электромагнитное, но не электромагнитное. (Аналогия неполная, закон взаимодействия не в точности одинаков, сильно различаются и свойства самих квантов. Однако обо всем этом позже, чтобы не отвлекаться от главного.)

Теперь процессы слабого взаимодействия действительно описываются аналогично электромагнитным процессам. Например, электромагнитный процесс рождения электрон-позитронной пары в квантовом

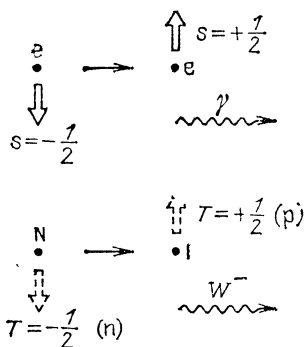


Рис. 9. В электромагнитном переходе, в котором электрон в состоянии «спин вниз» уничтожается, а электрон в состоянии «спин вверх» рождается, рождается электромагнитный квант  $\gamma$ . Аналогично уничтожение нуклона в состоянии «изоспин вниз» (нейтрона) и рождение нуклона в состоянии «изоспин вверх» (протона) сопровождается рождением кванта поля  $W$ , называемого  $W^-$ -бозон

переходе между протонами ядра происходит в два этапа. На первом уничтожается протон в начальном состоянии, рождаются протон в конечном состоянии и электромагнитный квант. На втором электромагнитный квант уничтожается, порождая пару электрон — позитрон. Процесс  $\beta$ -распада происходит аналогично в два этапа. На первом уничтожается нейтрон, рождается протон и квант слабого поля  $W^-$ . На втором этапе квант  $W^-$  уничтожается, порождая пару электрон — антинейтрино.

Поле  $W$  отличается от электромагнитного не только зарядом. Квант электромагнитного поля — фотон — безмассовая частица. Квант  $W$ -поля —  $W$ -бозон обладает массой почти в 100 раз большей, чем масса протона. Из-за большой массы  $W$ -бозона слабое взаимодействие происходит на очень малых даже по сравнению с размером ядра расстояниях. Это выделяет очень малую область, в которой происходят  $\beta$ -процессы, отсюда и «слабость» слабого взаимодействия. Электромагнитные волны распространяются на большие расстояния. Из-за большой массы  $W$ -бозонов  $W$ -поле действует на расстояниях, меньших  $10^{-16}$  см. Такое короткодействие  $W$ -взаимодействия приводит к тому, что при малых по сравнению с  $m_W c^2$  энергиях вызываемые им процессы оказываются на 10—20 порядков менее вероятными, чем процессы ядерного (сильного) или электромагнитного взаимодействия, если последнее возможно.

Между  $p$  и  $n$  действуют разные силы, разные поля. Мы рассматриваем сейчас те поля, которые связаны с превращением  $p \rightleftharpoons n$  в  $\beta$ -распадах и похожи на электромагнитное поле. В строении ядра, в энергии связи они совсем не главные!

Развитие идеи симметрии между нейтроном и протоном привело к единой теории слабого и электромагнитного взаимодействия. Но главные силы между нуклонами в ядрах связаны с сильным взаимодействием. Какова же природа ядерных сил?

### Теория Юкавы. Мезоны

В 1935 г. японский физик Х. Юкава предложил свою теорию ядерных сил. Он использовал симметрию между нейтроном и протоном и идею о взаимопревращениях протона и нейтрона в ядре.

Квантовый процесс уничтожения нейтрона и рождения протона в ядре приводил, согласно теории Юкавы, к рождению квантов поля сильного взаимодействия — новых частиц. Взаимодействие этих квантов с нуклонами должно быть очень сильным. Велика вероятность их рождения. Столь же велика и вероятность их поглощения другим нуклоном ядра. Если один нуклон в квантовом переходе породил такой квант, а другой нуклон поглотил этот квант, то тем самым осуществилось взаимодействие между нуклонами в ядре.

Обмен шайбой на катке всегда приводит к отталкиванию. Обмен частицами в квантовой теории может приводить и к отталкиванию, и к притяжению. Все зависит от того, какие частицы обмениваются квантом и каковы свойства такого кванта.

Наблюдаемые свойства ядер и закономерности связи нуклонов в ядре можно было объяснить в теории Юкавы, если масса частицы — кванта поля ядерных сил имела величину примерно в 260 раз большую, чем масса электрона. Гипотетическая частица, предсказываемая в теории Юкавы, должна была занимать промежуточное положение по массе между электроном и нуклоном. Эта частица должна была быть промежуточным агентом между взаимодействующими нуклонами. Ее стали называть *мезоном* (или мезотроном) от греческого «мезос» — средний, промежуточный. Теорию Юкавы стали называть *мезонной теорией*.

В действительности теория Юкавы предсказывала не одну частицу, а три. Превращение нейтрона в протон должно было сопровождаться рождением отрицательно заряженного мезона, превращение протона в нейтрон — положительно заряженного мезона. В ядре могут происходить и такие переходы, при которых протон остается протоном, а нейтрон — нейтроном. В таких переходах, согласно мезонной теории, должен был рождаться нейтральный мезон. Только так можно было обеспечить изоспиновую симметрию взаимодействия мезона с нуклонами.

Вследствие изоспиновой симметрии ядерных сил эти три частицы можно было рассматривать как три разных изоспиновых состояния одного и того же мезонного поля.

Итак, мезонная теория привлекла для объяснения сильного взаимодействия новые частицы — мезоны с положительным, отрицательным и нулевым электрическим зарядом и предсказывала величину их массы.

Теория Юкавы строилась по аналогии с электромагнетизмом, поэтому, вообще говоря, спин мезона должен был бы быть равным 1, но для простоты математических расчетов Юкава не учитывал спина мезонов, рассматривая их как частицы со спином 0. Оказалось, что именно этот простейший случай и осуществляется. Благодаря их нулевому спину обмен мезонами ведет к притяжению одинаковых частиц (например, двух нейтронов), и выбор спина 0 не только дан простоте. Как мы увидим, мезоны не играют такую фундаментальную роль в физике сильного взаимодействия, какую играют фотоны в электромагнетизме. Но сама постановка вопроса о существовании помимо электромагнитного новых полей взаимодействия и идея о связи таких полей с симметрией частиц сыграли очень важную роль в дальнейшем развитии физики.

Если при столкновении нуклонов есть избыток энергии, превышающий энергию покоя мезона, то возможен квантовый процесс рождения мезона в свободном состоянии. В 30-е гг. еще не было ускорителей частиц. Но были известны естественные потоки ускоренных частиц — космические лучи. В поисках мезонов физики обратились к изучению взаимодействия космических частиц в атмосфере.

В 1937 г. заряженная частица с массой приблизительно равной массе, предсказывавшейся для мезона в теории Юкавы, была найдена. Но это была не та частица!

### Странные времена — странные частицы

Частица, открытая в 1937 г. в космических лучах, была названа мезоном. Ее можно было бы назвать мезоном из-за «промежуточного» (между электроном и нуклоном) значения ее массы. Но эта частица не обладала ядерным взаимодействием. Она взаимодействовала с ядрами только потому, что была электрически заряженной. Она взаимодействовала с ядрами как электрон — за счет электромагнитного взаимодействия, а также (снова наподобие электро-



на) путем слабого взаимодействия. Был открыт *мюон*  $\mu^-$  — старший брат электрона. Как у электрона, у мюона  $\mu^-$  была античастица  $\mu^+$ . Позже было установлено, что с мюоном связано свое, *мюонное, нейтрино*. Электрон, мюон, нейтрино ( $\nu_e, \nu_\mu$ ) и их античастицы составили отдельное семейство *лептонов*.

В дальнейших исследованиях взаимодействия космических лучей историческая ошибка была исправлена и был открыт настоящий мезон,  $\pi$ -мезон. Именно та частица, которую предсказывала мезонная теория. Выяснилось, что заряженный  $\pi$ -мезон распадается на мюон и нейтрино. Поэтому-то в космических лучах в поисках частицы  $\pi$  и открыли частицу  $\mu$  — продукт распада  $\pi$ . Был открыт и предсказывавшийся мезонной теорией  $\pi^0$ -мезон, распадающийся на  $2\gamma$ -кванта.

Кроме «тяжелого электрона» — мюона, появились «тяжелые мезоны» —  $K$ -мезоны и «тяжелые нуклоны» — гипероны.

Изучая процессы рождения  $K$ -мезонов в первых ускорителях частиц, физики обнаружили странную закономерность.  $K$ -мезоны всегда рождались в паре с гиперонами или со своими античастицами (анти- $K$ -мезонами).

$K$ -мезоны и гипероны названы *странными частицами* и их *странность* стали измерять количественно, приписывая, например,  $K^+$ - и  $K^0$ -мезонам странность  $+1$ , а  $\Sigma^-$  и  $\Lambda$ -гиперонам — странность  $-1$ , а  $\Xi$ -гиперонам — странность  $-2$ . Странность мезонов и нуклонов предполагалась равной 0, странность античастиц должна была быть противоположной странности частиц. Странная частица могла родиться в процессе столкновения частиц с нулевой странностью (нуклонов или  $\pi$ -мезонов с нуклонами) только в паре со странными частицами с противоположной странностью. Тогда странность начального и конечного со-

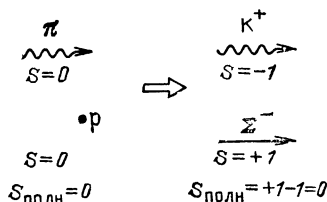


Рис. 10. Во всех реакциях сильного взаимодействия странность  $S$  сохраняется. Так, взаимодействие  $\pi^-$ -мезона ( $S=0$ ) с протоном ( $S=0$ ) ведет к рождению частиц  $K^+$ -мезона ( $S=-1$ ) и  $\Sigma^-$ -гиперона ( $S=+1$ ) с противоположной странностью. Полная странность при этом не меняется:  $S_{\text{полн}}=0$  как в начале, так и по окончании этой реакции

стояния реакции не меняется: была нулевая, нулевой и осталась (рис. 10).

Нестабильность была общим свойством новых тяжелых частиц. Но анализ их наблюдаемых времен жизни показывал, что скорей надо удивляться их замечательной стабильности.

Времена жизни странных частиц ( $10^{-8}$ — $10^{-10}$  с) были очень большими по сравнению со временем

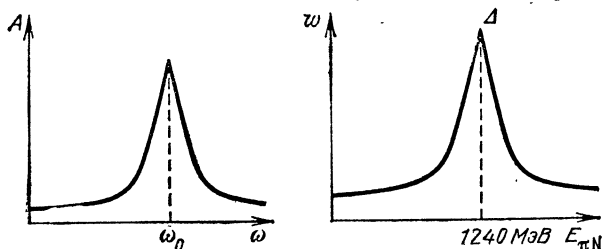


Рис. 11. Зависимость вероятности  $w$  взаимодействия пиона с нуклоном от полной энергии  $E_{\pi N}$  пион-нуклонной системы имеет резонансный характер. При энергии системы 1240 МэВ, равной массе  $\Delta$ -изобары, вероятность взаимодействия резко возрастает, как возрастает амплитуда  $A$  колебаний маятника при частоте колебаний  $\omega$ , равной резонансной  $\omega_0$ . Это сходство позволило назвать  $\Delta$ -изобару и многие другие подобные ей короткоживущие частицы частицами-резонансами

жизни ( $10^{-23}$  с) частиц — резонансов, обнаруженных при анализе распределения по энергиям образующихся в реакциях мезонов и нуклонов. Например, измеряя зависимость от полной суммарной энергии (включая и энергию покоя) вероятности образования  $\pi$ -мезона и нуклона, наблюдали картину, подобную резонансным кривым в теории колебаний. Аналогично резкому возрастанию амплитуды колебаний при определенной частоте при энергии вблизи 1240 МэВ вероятность образования  $\pi$ -мезона и нуклона резко возрастала. Наблюдался резонансный пик (рис. 11). Подобные резонансные пики наблюдались и в системе двух  $\pi$ -мезонов, и в системе трех  $\pi$ -мезонов... Эти пики отвечали рождению и быстрому распаду *частиц-резонансов*.

Такие частицы по традиции называли элементарными. Но исследования их свойств наталкивали на более реалистическую и простую картину. Снова — как в атомах и молекулах — на идею составных частиц.

## Составные модели частиц

Такой подход был впервые предложен Э. Ферми и Ч. Янгом еще в 1949 г. В своей работе они предложили рассматривать пион как связанную систему нуклона и антинуклона и указали на сходство свойств такой системы и  $\pi$ -мезона теории Юкавы. «Как недвусмысленно указано в статье, мы не питали никаких иллюзий на счет соответствия наших предположений действительности, — вспоминал потом Ч. Янг, — я вообще был склонен похоронить работу в черновиках и не публиковать ее. Ферми, однако, сказал, что решают задачи студенты, а научные работники ставят вопросы, и что он считает вопрос, поставленный нами, заслуживающим публикации». Б. М. Понтекорво отмечал, что когда эта работа появилась, «ряд физиков-теоретиков, даже очень почтенных, были, мягко говоря, удивлены, что великий Ферми решился опубликовать такую «неудовлетворительную и бессодержательную» статью».

Наиболее серьезно к идее Ферми и Янга отнеслись в СССР. Ферми и Янг рассматривали  $\pi^+$ -мезон как связанное состояние протона и антинейтрона ( $p\bar{n}$ ), а  $\pi^-$ -мезон как  $p\bar{n}$ ; с той же позиции можно рассматривать нейтральный мезон  $\pi^0$  как суперпозицию  $p\bar{p}$  с вероятностью 50 % и  $n\bar{n}$  с такой же вероятностью. Отсюда следует объяснение разности масс \*)  $m_{\pi^0}$  и  $m_{\pi^+} = m_{\pi^-}$ . В теории сильного взаимодействия все три массы равны, но добавочный учет кулоновского притяжения  $p\bar{p}$  уменьшает массу  $\pi^0$ . Само существование  $\pi^0$  было предсказано еще до войны. Тогда же отмечался и основной канал его распада на два фотона. На основе теории Ферми — Янга стало ясно, что должен иметь место и  $\beta$ -распад  $\pi^+$ -мезона  $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ . Это предсказание было сделано и проверено на опыте в СССР. Еще раньше явилась идея возможности существования других связанных состояний нуклона и антинуклона. Были проанализированы возможные пути их распада. Ожидаемое время жизни оказывалось столь коротким, что нельзя было рассчитывать на наблюдение трека (следа) частицы в камере Виль-

---

\*) Это объяснение остается в силе и в современной теории кварков

сона, фотоэмульсии или пузырьковой камере. Был предложен способ обнаружения таких частиц по «недостающей массе» при столкновении (неупругом рассеянии) пары хорошо наблюдаемых частиц, например, двух протонов.

Еще раньше Ферми открыл и начал исследование нового класса частиц — *резонансов* — с особо малым временем жизни. Понимание природы этих частиц как составных пришло только значительно позже с точки зрения кварков. Составные модели стали развиваться. В них включали и странные частицы, предполагая, например, что  $K^+$ -мезон — это связанное состояние протона и анти- $\Lambda$ -гиперона.

Выбрав за составляющие протон, нейтрон и  $\Lambda$ -гиперон, можно было построить из них и их античастиц все мезоны. Однако уверены ли мы в том, что сами протон, нейтрон и  $\Lambda$ -гиперон элементарны? Этот вопрос возник позже, была инерция мышления после успешной расшифровки состава ядра как системы из  $Z$  протонов и  $(A - Z)$  нейтронов. Оказалось, что сами протон, нейтрон и  $\Lambda$ -гиперон нельзя было рассматривать как элементарные.

Успех идеи о составной природе мезонов, о том, что они состоят из пары: частица со спином  $1/2$  — античастица со спином  $1/2$ , был не полным, поскольку выбор составляющих был не совсем удачен. Известные частицы  $p$ ,  $n$ ,  $\Lambda$  не могли в полной мере претендовать на роль строительного материала для всех сильно взаимодействующих частиц — *адронов* \*).

Но может быть, дело просто в том, что никакая известная частица не годится на роль строительного материала для адронов?

Чтобы подойти к идее истинных составляющих адронов, рассмотрим нуклон (протон  $p$  и нейтрон  $n$ ) и 4 частицы-резонансы в системе пиона и нуклона ( $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^-$ ). Спин нуклонов равен  $1/2$ , спин  $\Delta$ -резонансов  $3/2$ . Нуклон в ядре стабилен, а  $\Delta$ -резонансы за  $10^{-23}$  с распадаются на нуклон и пион. Если поверить, что  $\pi^+$ -мезон — это связанная система  $p\bar{p}$ , то  $\Delta$ -резонансы должны иметь еще более сложную структуру, например,  $\Delta^{++}$ , состоящий из  $p\pi^+$ , должен иметь  $p\bar{p}\pi$ , и т. п. Между тем разница между

---

\*) Название «адрон» происходит от латинского «адрес» — твердый, тяжелый.

$\Delta$  и  $n$  не так велика. Сегодня мы описываем и  $\Delta$ , и нуклоны единообразно и полагаем, что это все — комбинации трех *кварков* (частиц с дробным зарядом и спином, равным  $1/2$ , см. следующий пункт).

Тогда  $\Delta^{++}$  (электрический заряд  $+2$ ) можно составить из трех составляющих типа  $u$  ( $u$ -кварки), электрический заряд которых равен  $+2/3$ , а  $\Delta^-$  — из трех составляющих типа  $d$  ( $d$ -кварки), электрический заряд которых равен  $-1/3$ . Комбинации  $(2u, d)$  и  $(u, 2d)$  имеют электрический заряд, соответственно,  $+1$  и  $0$ . В этих трехкварковых комбинациях спины всех кварков могут быть ориентированы параллельно, что отвечает  $\Delta^+$  и  $\Delta^0$  со спином  $3/2$ , или спины двух кварков ориентированы в одном направлении, а третьего кварка — в противоположном, что отвечает нуклонам, спин которых равен  $1/2$ . Так, можно было прийти к идее кварков сразу после открытия нуклонных резонансов. Однако исторически такое понимание пришло с большим трудом. Для системы  $\Delta$  и  $n$  кварки были необязательны. Такой подход вызвал бы в то время много недоуменных вопросов и, главное, господствовавшие «принципы экономии» препятствовали появлению в теории таких экзотических объектов, как *дробно-заряженные составляющие*. Более приемлемыми казались составные модели с «чистыми» пранейтроном  $n$  и прапротоном  $p$ . В этих моделях реальный протон представляет собой комбинацию  $ppn$ , реальный нейтрон — комбинацию  $pnp$ ,  $\Delta^{++}$  — комбинацию  $2p\bar{p}$ , ...,  $\Delta^-$  — комбинацию  $2p\bar{n}$ .

Очевидно, что кварковая модель изящнее, но требует дробных зарядов составляющих. С другой стороны, простая модель с  $p$  и  $n$  составляющими со спином  $1/2$  несовместима с принципом Паули и принципом, чтобы все нижние состояния ( $\Delta$ ,  $p$ ,  $n$ ) не имели орбитальных моментов. Но та же проблема возникала и в кварковой модели при описании, например,  $\Delta^{++}$  ( $3u$ -кварка) в дополнение к проблеме отсутствия свободных кварков. Это были трудности, из которых теория вышла окрепшей:

«Так тяжкий млат,  
Дробя стекло,  
Кует булат».

(А. С. Пушкин)

Возможно, *только* через открытие странности и следующих «ароматов» частиц можно было *доказать* кварковую модель. Но видно, что *изобрести* (пусть ненадежную) кварковую модель можно было и раньше. Сковывали инертность, страх перед существенно новым.

## Кварки

В 1963 г. М. Гелл-Манн и Дж. Цвейг предложили гипотезу о трех *кварках*, трех фундаментальных составляющих адронов. Они указали, что все наблюдаемые свойства симметрии адронов и их взаимопревращений можно очень просто объяснить предположением о том, что все адроны (в том числе и  $p$ ,  $n$  и  $\Lambda$ ) — составные и что существуют гипотетические частицы — кварки, составляющие все адроны.

Пусть имеется тройка частиц со спином  $1/2$  (в единицах  $\hbar$ ) и барионным зарядом  $1/3$ :  $u$ -кварк с электрическим зарядом  $+2/3$ ,  $d$ -кварк с зарядом  $-1/3$  и  $s$ -кварк с зарядом  $-1/3$ . У них имеются античастицы — антикварки с противоположным знаком барионного и электрического заряда. Кварки  $u$  и  $d$  рассматриваются как две изоспиновые компоненты одной и той же частицы. Отсюда и обозначения:  $u$  от английского  $up$  — вверх, это — состояние «изоспин вверх»,  $d$  — от английского  $down$  — вниз, это — состояние «изоспин вниз». Им приписывалась нулевая странность. Кварки  $u$  и  $d$  и их антикварки должны составлять нуклоны и антинуклоны,  $\pi$ -мезоны,  $\pi$ -мезон-нуклонные и  $\pi$ -мезон- $\pi$ -мезонные резонансы. Кварк  $s$  — это *странный кварк*. Это кварк, обладающий странностью, равной  $-1$ . Отсюда и обозначение  $s$ , от английского  $strange$  — странный. Кварк  $s$  входит в состав странных частиц. Тип ( $u$ ,  $d$  или  $s$ ) называют ароматом кварка.

В модели кварков мезоны — это связанные состояния кварк — антикварк. Например, в модели Ферми — Янга  $\pi^+$ -мезон рассматривался как связанная система протона  $p$  и антинейтрона  $\bar{n}$ . В модели кварков — это связанное состояние  $u$ - и  $\bar{d}$ -кварков. При этом все выводы, сделанные на основе модели Ферми — Янга для мезонов, оставались в силе. Добавились странные мезоны:  $K^+$ , состоящий из  $u$  и  $\bar{s}$ ,  $K^-(\bar{u}s)$ , и два ней-

тральных мезона, составленные из  $d\bar{s}$  и  $s\bar{d}$ . На их очень интересных свойствах мы не останавливаемся.

В кварковой модели барионы и барионные резонансы состоят из трех кварков, а антибарионы — из трех антикварков.

Например, протон состоит из двух  $u$ -кварков и одного  $d$ -кварка, нейтрон — из двух  $d$ -кварков и одного  $u$ -кварка,  $\Delta^{++}$ -резонанс — из трех  $u$ -кварков,  $\Delta^-$ -резонанс — из трех кварков, антипротон — из двух анти- $u$ -кварков ( $\bar{u}$ ) и одного анти- $d$ -кварка ( $\bar{d}$ )\*).

### Трудности теории кварков

Кварки имеют спин  $1/2$  (в единицах  $\hbar$ ). Как и электроны. Как и нуклоны. Для кварков одного и того же типа должен быть справедлив принцип запрета Паули. Два одинаковых кварка не могут находиться в состоянии с одним и тем же направлением спина. Но для резонансов  $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^-$  кварковая модель предсказывала именно такую ситуацию. Согласно теории кварков они состоят из трех кварков одного типа:  $\Delta^{++}$  — из трех  $u$ -кварков,  $\Delta^-$  — из трех  $d$ -кварков. Спин кварков равен  $1/2$ . Спин  $\Delta^{++}$  и  $\Delta^-$  равен  $3/2$ . Было естественно считать, что все кварки находятся на одном и том же низшем энергетическом уровне, в состоянии с нулевым орбитальным моментом. Но тогда спины трех составляющих кварков должны быть ориентированы в одном и том же направлении. Это противоречит принципу запрета Паули — основе статистики систем тождественных частиц с полужелым значением спина.

---

\*) В процессах сильного и электромагнитного взаимодействия кварк данного типа может рождаться или уничтожаться только в паре со своим антикварком. Поэтому-то и наблюдается парное рождение странных частиц. Например, реакция сильного взаимодействия  $p + N \rightarrow \Lambda + K^+$  обусловлена рождением пары  $s$  и  $\bar{s}$ , входящих, соответственно, в состав  $\Lambda$  и  $K^+$ . В процессах слабого взаимодействия кварк одного типа может поодиночке превращаться в кварк другого типа. При этом в модели кварков вся совокупность процессов слабого взаимодействия адронов сводилась к взаимодействию токов превращений  $u$ -кварка в  $d$ -кварк и  $u$ -кварка в  $s$ -кварк. Например, превращение нейтрона в протон при  $\beta$ -распаде нейтрона — это процесс, в котором один из  $d$ -кварков нейтрона превращается в  $u$ -кварк. Слабый ток именно этого перехода взаимодействует со слабым током рождающейся в  $\beta$ -распаде пары электрон — нейтрино (см. далее).

Другая проблема — отсутствие кварков в свободном состоянии.

Разве можно сказать, что адроны действительно состоят из кварков?

Если дом построен из бревен, мы можем раскатать его на бревна. Дом из кирпича можно разобрать на отдельные кирпичи. Если что-то построено из чего-то, мы можем разделить это что-то на то, из чего оно построено. Можно составить — можно и разобрать. Можно выделить составляющие в чистом виде.

Химическое соединение можно разложить на отдельные химические элементы. Атом можно ионизовать и получить составляющие его ядро и нейтроны. Можно расщепить ядро на протоны и нейтроны, из которых оно состоит. *А расщепить частицы на кварки оказалось невозможным.*

Росли энергии частиц, разгоняемых на ускорителях. Частицы все большей энергии дробили протоны и нейтроны. Как в сказке: били-били — не разбили. Во взаимодействиях частиц с адронами адроны не расщеплялись на кварки. Адроны превращались в новые адроны. Эти превращения можно было описать на языке теории кварков. Можно было указать, сколько новых пар кварк — антикварк родилось. Какие переходы между кварками произошли. Но в чистом виде кварки не рождались. Наблюдались только их связанные состояния.

Другое доказательство отсутствия свободных кварков пришло из космологии. Расширяющуюся Вселенную можно назвать «ускорителем для бедных». В ходе своей эволюции Вселенная проходила стадии сверхвысоких плотностей энергии, на которых в естественных условиях разворачивались процессы, предсказываемые теорией для частиц сверхвысоких энергий. Применяя эти представления для кварков и рассматривая расширение Вселенной как способ спасения свободных кварков, можно было убедиться в том, что, если бы кварки могли существовать в свободном состоянии, они существовали бы в очень ранней Вселенной и, пройдя через все этапы эволюции Вселенной, содержались бы в земном грунте в количестве, сравнимом с обилием золота. Поиск кварков в веществе показал, что свободных кварков в грунте нет и в количестве на 10 порядков меньше, чем предсказывалось космологией. Этот результат служил сильным



аргументом против существования кварков в свободном состоянии. Кварки могли быть только связанными в адронах.

### Цвет кварков

С чем связано нарушение принципа Паули в системах связанных кварков? С тем, что кварки одного типа тождественны, неотличимы один от другого.

$\Delta^{++}$  и  $\Delta^{-}$  являются системами трех одинаковых кварков, помещенных с одинаковым направлением спина в одно и то же состояние. Но может, у кварков есть еще какое-нибудь отличие? Может, их можно как-то пометить и отличить по этим меткам один от другого, покрасить три составляющих  $\Delta$  кварка в разные цвета?

Да, именно покрасить!

Не только  $u$ ,  $d$  и  $s$  отличаются друг от друга. Может быть, есть три различных  $u$ -кварка, три различных  $d$ -кварка, три различных  $s$ -кварка.

Осторожный человек постарался бы спрятать это нововведение, ввести индексы:  $u_1$ ,  $u_2$  и  $u_3$ ;  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_3$ ;  $s_1$ ,  $s_2$  и  $s_3$  — замаскировать тот факт, что число сильно взаимодействующих элементарных частиц утроилось!

К счастью, физики не лишены темперамента и стремления к яркости. Умножение числа кварков обернулось образной красочной картиной. Физики решили, что у невидимых кварков есть невидимые «цвета» (этот цвет не имеет отношения к оптике). Есть цвета, которые прячутся вместе со своими носителями — кварками — внутри адрона. Внутри адрона кварки можно различить по цвету. Между кварками разного цвета полная симметрия. Их массы, электрические заряды и все остальные (кроме цвета) характеристики — *точно* одинаковы. Тогда  $\Delta^{++}(\Delta^{-})$  оказываются системами трех разных  $u$ -( $d$ -) кварков — они состоят из кварков одного типа (аромата), но разного цвета. Например,  $\Delta^{++}$  состоит из одного желтого  $u$ -кварка, одного красного  $u$ -кварка и одного синего  $u$ -кварка. Составляющие  $\Delta^{++}$   $u$ -кварки находятся в разных цветовых состояниях — в полном соответствии с принципом запрета Паули.

Итак, физики обратились к динамике цветовых зарядов и связанных с ними полей.

## Квантовая хромодинамика

Анализ цветового зрения говорит, что все богатство окружающих нас красок — различные сочетания трех основных цветов. Таково свойство человеческого восприятия. Многообразие адронных превращений — результат взаимодействий трех цветов кварков, проявление фундаментального цветового взаимодействия. Оказалось, что такое взаимодействие можно описать по аналогии с квантовой теорией электромагнитного взаимодействия — квантовой электродинамикой (которую сокращенно называют КЭД). Для квантовой теории цветового взаимодействия даже используют созвучное название *квантовая хромодинамика* (сокращенно КХД). Достаточно популярное изложение представлений КХД содержится в книге Л. Б. Окуня « $\alpha\beta\gamma \dots Z$ ». Ограничимся поэтому лишь некоторыми аспектами этих представлений, развывая их аналогию с представлениями КЭД.

В квантовой электродинамике важнейшую роль играет безразмерная величина, называемая *постоянной тонкой структуры*  $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$ , где  $e$  — электрический заряд электрона. Величина  $\alpha$  характеризует вероятность испускания или поглощения электромагнитного кванта, вероятность превращения этого кванта в пару электрон — позитрон или аннигиляции такой пары в электромагнитный квант. Все эти процессы сводятся к одному и тому же элементарному акту взаимодействия. Любой электромагнитный процесс оказывается при этом комбинацией элементарных актов взаимодействия.

Для расчета вероятности того или иного квантового процесса теоретики используют *диаграммы Фейнмана* — графические картинки, позволяющие выделить структуру такого процесса, складывающуюся из элементарных актов взаимодействия, связанных виртуальными частицами \*). Элементарному акту электромагнитного взаимодействия отвечает простейшая диаграмма Фейнмана (рис. 12). Рассматривая ее с разных сторон, мы получаем либо (рис. 12, а) квантовый переход, в котором начальный электрон  $e_1$  (или позитрон) уничтожается и рождается конечный элек-

\*) См., например, книгу: Фейнман Р. КЭД — странная теория света и вещества. — М.: Наука, 1988. — Библиотечка «Квант», вып. 66.

трон  $e_2$  (позитрон) и при этом рождается или уничтожается электромагнитный квант  $\gamma$ , либо (рис. 12, б) процесс уничтожения электромагнитного кванта и рождения пары электрон — позитрон, либо (рис. 12, в) процесс уничтожения пары электрон — позитрон и рождения электромагнитного кванта. Все эти процессы отвечают одному и тому же элементарному

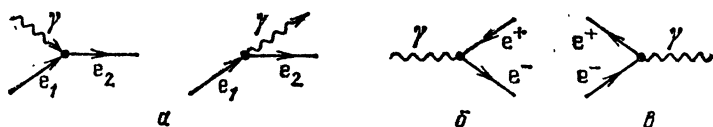


Рис. 12. Элементарный электромагнитный процесс изображается одной и той же картинкой — графиком Фейнмана. Рассматривая эту картинку с разных сторон, мы наблюдаем изображения различных эффектов: а — поглощение и рождение электромагнитного кванта  $\gamma$  электроном, б — рождение пары электрон — позитрон электромагнитным квантом, в — рождение электромагнитного кванта при аннигиляции электрона и позитрона

акту взаимодействия с электромагнитным квантом (тока и заряда) электромагнитного перехода, т. е. превращения электрон — электрон (позитрон — позитрон), рождения или аннигиляции пары электрон — позитрон.

На основе элементарного акта КЭД, вероятность которого пропорциональна  $\alpha = 1/137$ , можно описать любой квантовый процесс электромагнитного взаимодействия.

Например, для того чтобы произошел квантовый процесс рассеяния электрона на электроне (рис. 13), требуется одно рождение и одно уничтожение электромагнитного кванта. В одном квантовом переходе квант должен родиться, во втором уничтожиться. В процессе электронного рассеяния могут происходить и другие процессы: может родиться и уничтожиться еще один квант (рис. 14), квант может превратиться в пару электрон — позитрон и снова родиться при их аннигиляции (рис. 15). Все эти процессы с дополнительным рождением и уничтожением электромагнитных квантов можно рассматривать как поправки к основному процессу (рис. 13), потому что они характеризуются величиной, пропорциональной дополнительной степени  $\alpha^2 = (1/137)^2$ .

Учет всех процессов дополнительных рождений и уничтожений электромагнитных квантов приводит к

некоторой (хотя и слабой) зависимости «постоянной»  $\alpha$  от расстояния. На малых расстояниях  $\alpha$  возрастает.

В квантовой хромодинамике гипотеза о цвете кварков позволяет определить заряды (и токи) сильного взаимодействия и ввести поле цветового взаимодействия, связанное с этими зарядами. Такое поле, «склеивающее» кварки в адронах, называют *глюонным*, от английского glue — клей. Частица — квант глюонного

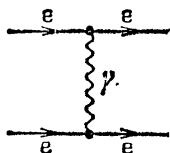


Рис. 13. Электромагнитное взаимодействие электронов обусловлено рождением и поглощением электромагнитного кванта  $\gamma$ .

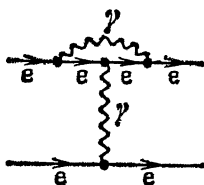


Рис. 14. В процессе взаимодействия двух электронов может происходить дополнительное рождение и поглощение электромагнитного кванта  $\gamma$ .

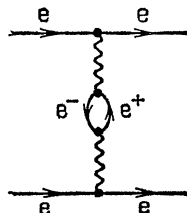


Рис. 15. Электромагнитный квант, рождаемый и уничтожаемый в процессе взаимодействия электронов может «по пути» превращаться в пару электрон — позитрон

поля называется *глюоном* и обозначается  $g$ . Токи (и заряды) цветовых переходов являются источниками глюонов аналогично тому, как ток (и заряд) электромагнитного перехода является источником электромагнитного кванта. Элементарный акт сильного взаимодействия описывается диаграммой Фейнмана, изображенной на рис. 16 и отвечающей взаимодействию глюона  $g$  с током (и зарядом) цветового перехода между кварками  $q$ .

В квантовой хромодинамике вводится константа  $\alpha_s$ , которая характеризует вероятность испускания или поглощения глюона цветовыми зарядами, вероятность рождения глюоном пары кварк — антикварк или аннигиляции такой пары в глюон. Эти процессы — разные проявления одного и того же элементарного акта сильного взаимодействия на рис. 16. Рассматривая переходы кварков из любых 3-х начальных цветовых состояний в любые 3 конечные цветовые состояния, легко убедиться, что полное число таких переходов

дов равно  $3 \times 3 = 9$ . Однако только 8 таких переходов связаны с цветовыми превращениями. Девятый переход — это переход между кварками одного и того же цвета, переход, в котором цвет кварков не меняется и не различается. Девятый глюон был бы «дальтоником» и непосредственно связывался бы с числом квар-

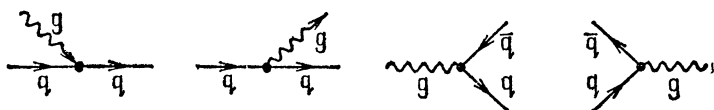


Рис. 16. Рассматривая с разных сторон элементарный процесс взаимодействия кварков с глюонами, мы получаем изображения процессов: поглощения и рождения глюона кварком, превращения глюона в пару кварк — антикварк или рождения глюонов при аннигиляции кварка и антикварка

ков в адроне (минус число антикварков), т. е. с барионным зарядом. Такое бесцветное поле отвечало бы взаимодействию между барионными зарядами. Экспериментальная проверка принципа эквивалентности инертной и гравитационной массы, проведенная в опытах типа опыта Этвеша с высокой точностью, исключает возможность существования дальнего действующего поля, связанного с барионным зарядом.

Таким образом, все 8 глюонов оказываются «окрашенными». Между ними также возможны квантовые переходы — источники новых глюонов. Поэтому структура КХД оказывается сложнее, чем структура КЭД. Помимо элементарного акта, изображенного на рис. 16, в КХД имеются элементарные процессы «самодействия глюонов». В этих процессах, описываемых диаграммами рис. 17, источниками новых глюонов являются квантовые переходы между глюонами.

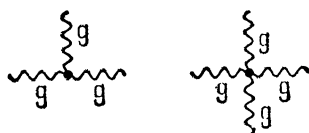


Рис. 17. В отличие от квантовой электродинамики в квантовой хромодинамике имеются дополнительные элементарные процессы самодействия глюонов

То обстоятельство, что глюоны сами несут цветовой заряд, существенно меняет закон их взаимодействия на больших расстояниях. Возникает так называемый *конфайнмент* — невылетание цветового заряда. Вследствие невылетания цветовой заряд экранируется,

поэтому свободные цветные частицы — глюоны и кварки — не существуют.

Различие в электромагнитных и цветовых взаимодействиях проявляется и в том, что квантовая хромодинамика обладает асимптотической свободой — чем меньше расстояние между цветовыми зарядами, тем слабее их взаимодействие. Из принципа неопределенности следует, что процессы на малых расстояниях происходят при большой передаче импульсов. Это позволило объяснить наблюдавшиеся в экспериментах закономерности взаимодействия кварков на малых расстояниях. Асимптотическая свобода на малых расстояниях между цветовыми зарядами является обратной стороной конфайнмента на больших расстояниях.

### Свободные кварки в нуклоне

Если рассеяние меняет внутреннее состояние частиц, участвующих в рассеянии, то говорят о неупругом рассеянии. В рассеянии частиц высокой энергии состояние нуклона меняется настолько сильно, что вводят специальный термин — *глубоконеупругое рассеяние*. Рассеяние адрона на нуклоне — это взаимодействие двух сложных составных объектов. А вот лептон (или фотон) в сильном взаимодействии не участвует. И его превращения можно рассчитывать количественно.

Физика взаимодействия лептонов с адронами позволила заглянуть внутрь адронов, экспериментально исследовать свойства их составляющих. Такие исследования начали интенсивно проводиться в конце 60-х — начале 70-х гг. с созданием на ускорителях интенсивных пучков энергичных лептонов.

Подобно тому как  $\alpha$ -частицы в опытах Резерфорда взаимодействовали с отдельными составляющими атома, проникая в глубь нуклона, лептоны взаимодействовали с отдельными его составляющими. Нуклон оказывался действительно составной частицей, составленной из кварков. Опыты по глубоконеупругому рассеянию подтверждали асимптотическую свободу цветового взаимодействия.

Асимптотическая свобода цветового взаимодействия обеспечивает слабое взаимное влияние составляющих нуклона в процессах глубоконеупругого рассеяния

лептонов. В этих процессах лептон передает кварку большую энергию  $\Delta E$  и большой импульс  $\Delta P$ . Этот процесс происходит очень быстро за время  $\sim \hbar/\Delta E$ . Из-за асимптотической свободы взаимодействия кварков с глюонами передать всю эту энергию и импульс сразу, так сказать, «единым глюоном», кварк не может — вероятность этого мала. Более вероятно передача энергии и импульса по частям — вероятность этого больше, но и характерное время передачи энергии и импульса по частям — небольшими порциями — оказывается значительно больше, чем время взаимодействия кварков с лептонами.

Поэтому с лептонами кварк взаимодействует быстро, а с окружающими его в нуклоне кварками и глюонами — медленно. В кратковременном процессе взаимодействия лептона с кварком медленные процессы взаимодействия с другими кварками не успевают проявиться. Вот почему глубоконеупругое рассеяние лептонов на нуклонах выглядит так, как если бы кварки в нуклоне вообще не взаимодействовали. Но наиболее яркие подтверждения квантовой хромодинамики связаны с открытием очарованного кварка.

### «Ноябрьская революция»

В 1974 г. в экспериментах по аннигиляции электронов и позитронов, разогнанных навстречу друг другу, была открыта частица нового типа.

Частицу открыли независимо две группы физиков. Одна группа назвала ее  $J$ -частицей (джерей-частицей), другая назвала ее  $\psi$ -частицей (пси-частицей). Частицу стали называть  $J/\psi$  (джерей-пси).

Рождение  $J/\psi$ -частиц проявлялось как очень узкий резонанс (значительно более узкий, чем все известные частицы-резонансы) в процессе: электрон + позитрон  $\rightarrow J/\psi$ -частица  $\rightarrow$  продукты ее распада. Новая частица была нейтральной; она взаимодействовала и с лептонами, и с адронами; обладала спином 1.

Было открыто целое семейство таких частиц.  $J/\psi$  все более уверенно отождествлялась со связанным состоянием нового очарованного кварка и его антикварка. Существование такого кварка было предсказано в теории слабого взаимодействия (см. ниже). Очарование  $s$ -кварка в  $J/\psi$  компенсировалось присутствием анти- $s$ -кварка. В  $J/\psi$  очарование явным образом не

проявлялось. Это была частица со *скрытым очарованием*. Начался интенсивный поиск частиц с явным очарованием. И такие частицы вскоре были открыты.

Открытие  $J/\psi$  произошло в ноябре 1974 г. Это открытие вызвало бурный поток теоретических идей и экспериментальных предложений. На равной основе рассматривались самые разные теоретические объяснения природы  $J/\psi$ . При обсуждении таких идей не смущало предсказание новых частиц. Экономным теориям предпочтение не оказывалось. В физике происходил переворот. Этот переворот иногда именовался в литературе «ноябрьской революцией».

Средневековый философ У. Оккам выдвинул принцип «бритвы», отсекающий в науке все лишнее, не необходимое. Принцип бритвы Оккама гласил: «*Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem*» («Сущности не следует умножать без необходимости»). Это была древнейшая формулировка принципа экономии: все, что не необходимо, не существует. Отсекай все, что не доказано. Э. Мах доводил этот принцип до абсурда в своих представлениях о науке как о принципе экономии мышления.

Ноябрьская революция, казалось, впадала в другую крайность, предавая этот принцип забвению. Теории, содержащие новые гипотетические частицы, стали выдвигаться безбоязненно. Единственной возможностью их отсечь была проверка их предсказаний в экспериментах.

И среди обилия различных теоретических объяснений свойств семейства  $J/\psi$ -частиц все ярче выявлялась доказательная сила квантовой хромодинамики.

Квантовая хромодинамика позволила объяснить, почему  $J/\psi$ -резонанс оказывается таким узким. Адроны и, в частности,  $J/\psi$ -частица не имеют цветового заряда. Поэтому в паре  $\bar{c}s$ , составляющей  $J/\psi$ , цветовой заряд полностью скомпенсирован. Из сохранения цветового заряда следует, что не обладающая цветовым зарядом пара  $\bar{c}s$  не может превратиться в один глюон, несущий цветовой заряд. Связанная пара  $\bar{c}s$  подобна электрически нейтральной системе связанных электрона и позитрона — системе позитрония — «атому», у которого ядром является позитрон. Исходя из этой аналогии систему  $\bar{c}s$  называют *чармонием* (от английского слова *charm* — очарование).



Если спины электрона и позитрона направлены в противоположные стороны, то это — система с нулевым полным спином — *парапозитроний*. При аннигиляции электрона и позитрона парапозитроний превращается в два фотона.

Если спины электрона и позитрона ориентированы в одном направлении, то это — система с единичным полным спином — *ортопозитроний*. Такая система может превратиться только в три фотона.

$J/\psi$  имеет спин 1. Это связанное состояние очарованного кварка с и его антикварка  $\bar{c}$  подобно ортопозитронию, и превратиться это состояние может только в три глюона. Этим глюонам передается довольно большая энергия и импульс, поэтому вероятность испускания каждого глюона оказывается небольшой, а распад  $J/\psi$  происходит, если все три глюона рождаются одновременно. Потом глюоны саморазмножаются, рождаются пары легких кварков и антикварков, но вероятность этих последующих процессов уже можно считать равной единице. Они медленно разворачиваются после быстрого процесса распада на глюоны. При этом вероятность распада  $J/\psi$ , пропорциональная произведению трех малых величин  $\alpha_s$ , подавляемая дополнительно малым коэффициентом, оказывается малой.

### Кварки в $e^-e^+$ -аннигиляции

Другой пример успешного применения представлений квантовой хромодинамики дает физика процессов аннигиляции электронов и позитронов в адроны.

В рамках гипотезы кварков процесс электрон-позитронной аннигиляции в адроны выглядит следующим образом: электрон и позитрон уничтожаются и рождается электромагнитный квант. Потом этот квант уничтожается и рождается пара кварк—антикварк. Эта пара затем как-то превращается в адроны, но на вероятность процесса это последнее превращение уже не влияет. Полная вероятность аннигиляции электрона и позитрона в адроны определяется вероятностью рождения пары кварк—антикварк. Глюоны электрически нейтральны и не дают вклада в эту вероятность.

Превращение: электрон  $\bar{+}$  позитрон  $\rightarrow$  электромагнитный квант  $\rightarrow$  электрон  $+$  позитрон интерферирует с рассеянием электрона на позитроне. Поэтому  $e^+e^-$ -аннигиляцию в пару  $e^+e^-$  экспериментально трудно выделить. В результате обоих процессов получается одно и то же. А вот превращение: электрон  $+$  позитрон  $\rightarrow$  электромагнитный квант  $\rightarrow$  пара  $\mu^+\mu^-$  может происходить только за счет аннигиляции электрона и позитрона. Именно это превращение и взяли за эталон для сравнения с аннигиляцией электрона и позитрона в адроны.

Согласно квантовой электродинамике вероятность рождения пары кварк — антикварк отличается от вероятности рождения пары  $\mu^+\mu^-$  только величиной заряда кварков (ее, согласно кварковой модели, надо брать дробной). Вероятность рождения пары анти- $u$  ( $\bar{u}$ ) и  $u$ -кварка относится к вероятности рождения  $\mu^+\mu^-$  как  $4/9$ ; а для пар  $\bar{d}d$  и  $\bar{s}s$  — как  $1/9$ . В электрон-позитронной аннигиляции может родиться любая из пар кварков. Отношение полной вероятности аннигиляции в любую пару к вероятности аннигиляции в пару  $\mu^+\mu^-$  должно было равняться сумме этих величин:  $4/9 + 1/9 + 4/9 = 2/3$ . Тем самым отношение  $R$  вероятности аннигиляции электрона и позитрона в адроны к вероятности их аннигиляции в  $\mu^+\mu^-$  должно было составлять  $R = 2/3$ . На опыте наблюдается величина, близкая к 2 ниже порога рождения очарованных частиц. Отличие в 3 раза связано с тем, что каждый тип кварка выступает в трех различных цветовых состояниях и все эти состояния рождаются в  $e^+e^-$ -аннигиляции. Но почему тогда разные цвета кварков не проявляются у образующихся адронов?

### Конфайнмент

Согласно квантовой хромодинамике на больших расстояниях между цветовыми зарядами величина  $\alpha_s$  становится совсем большой. Как обратная сторона асимптотической свободы цветовых зарядов, удаленных друг от друга на малое расстояние, возникла идея об абсолютном связывании — конфайнменте (английское *confinement* — тюремное заключение, ограничение свободы передвижения) цветовых зарядов на расстояниях порядка размеров ядра. На больших расстояниях цветовые заряды друг от друга уда-

ляться не могут. Из-за саморазмножения глюонов, из-за самодействия глюонных полей цветовое взаимодействие «самозамыкается» в размерах порядка ядерных. Кварки — объекты цветные. Конфайнмент цветовых зарядов объясняет, почему кварки или цветные частицы не наблюдаются в свободном состоянии.

Иногда связывание цветовых зарядов представляют себе как стягивание глюонного поля (поля цветового заряда) в трубку с постоянной плотностью

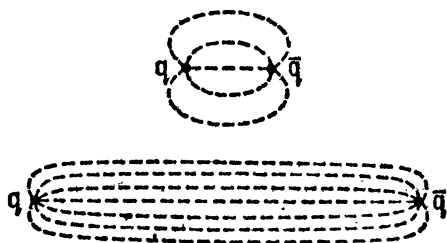


Рис. 18. Глюонное поле между кварком и антикварком на больших расстояниях стягивается в трубку

энергии (рис. 18). Эта трубка стягивает цветовые заряды, так что потенциальная энергия их взаимодействия растет пропорционально расстоянию между зарядами.

На малых расстояниях система чармония сходна с атомом водорода или с позитронием. Масса глюонов предсказывается равной нулю, поэтому на малых расстояниях цветовое взаимодействие кварков подобно электромагнитному — потенциал их взаимодействия подобен кулоновскому потенциалу. На больших расстояниях глюонное поле стягивается в трубку и отвечает потенциалу, линейно растущему с расстоянием между кварками.

Количественный анализ системы чармония для потенциала, выбираемого в виде суммы «цветового кулоновского» потенциала и линейно растущего с расстоянием между  $s$ -кварками, позволяет хорошо описать свойства частиц семейства  $J/\psi$ .

Представление о трубке глюонного поля позволяет также понять, почему во всех случаях  $e^+e^-$ -аннигиляции независимо от цвета рождающихся кварков адроны получаются одинаково бесцветными?

Если, например, цветовые заряды разлетаются, как разлетаются два кварка, рожденные в электрон-позитрон-

тронной аннигиляции, то по мере разлета потенциальная энергия взаимодействия цветовых зарядов растет и в некоторый момент начинает превышать энергетический порог рождения новой пары кварк—антикварк. Трубка разрывается. На месте разрыва появляются новые кварк и антикварк. Возникают уже две трубки (рис. 19), которые в свою очередь растягиваются, разрываются и образуют новые пары кварк—антикварк. Так можно качественно понять, почему образующиеся

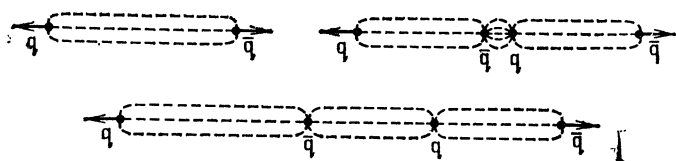


Рис. 19. Разрыв трубки глюонного поля между разлетающимися кварком и антикварком и рождение пар кварк—антикварк на месте разрыва — механизм множественного рождения адронов в процессах при высоких энергиях

в  $e^+e^-$ -аннигиляции адроны не несут цвета рождающихся кварков. Конфайнмент цветовых зарядов приводит к полному экранированию цвета.

Представление о разрывах трубок глюонного поля позволяет наглядно представить, как образуются в  $e^+e^-$ -аннигиляции мезоны — связанные состояния кварка и антикварков. Но среди продуктов  $e^+e^-$ -аннигиляции наблюдают и пары барион—антибарион. В рамках представлений о трубках глюонного поля описать рождение этих пар не так-то просто.

Когда речь идет о малых энергиях и, в частности, о нижнем энергетическом состоянии, кварки далеко не удаляются друг от друга, длинные трубки не образуются. Тогда возможно другое описание конфайнмента. Адрон представляют как мешок, в котором движутся почти свободные кварки (или в мезонах и антибарионах — антикварки), составляющие адрон. В этой модели есть свои проблемы. Например, что такое «мешковина».

Количественная теория конфайнмента пока не разработана. Да и качественные представления о его механизмах нужно еще уточнять. Продолжается поиск специфических для квантовой хромодинамики новых частиц — связанных состояний глюонов — глюоболлов. Обсуждается возможность существования новых экзотических

тических частиц (например, связанных шестикварковых систем — дибарионов). Физики надеются, что развитие квантовой хромодинамики позволит построить на ее основе и количественную теорию конфайнмента цветового заряда. Дело это не простое. Квантовая хромодинамика пока еще — количественная теория сильного взаимодействия в условиях, когда это взаимодействие оказывается совсем не сильным. Нет сомнения, что картина, основанная на кварках и глюонах, качественно верна и в тех областях, где их взаимодействие действительно сильное. Уже появляются работы, в которых специфика ядерных сил анализируется с учетом кварковой структуры. Но количественные проблемы здесь пока не решены.

В квантовой хромодинамике ядерные силы оказываются аналогичными силам Ван-дер-Ваальса, действующим между нейтральными атомами. Кулоновское взаимодействие между атомами отсутствует, но имеются существенно более слабые, чем кулоновские, силы Ван-дер-Ваальса между атомами, имеющие квантовую природу и отражающие наличие электрических сил между электронами и ядрами. Нечто подобное должно возникать и между нуклонами в ядре — межнуклонные силы должны появляться как остаточный эффект цветового взаимодействия кварков и глюонов. Однако в отличие от случая ван-дер-ваальсовых сил, явная связь межнуклонного и цветового взаимодействия не так проста. Поэтому в ядерной физике до сих пор широко применяют представления теории Юкавы о межнуклонном взаимодействии как обмене пионами и другими мезонами, рассматривая эти представления как способ описания эффектов цветового взаимодействия в области конфайнмента.

Замечательным свойством цветового взаимодействия оказалась его слабость на малых расстояниях. Вместе с тем конфайнмент принципиально более важен по сравнению с асимптотической свободой.

Конфайнмент дает новое качество. Оказывается, что могут быть элементарные частицы — кварки и глюоны — принципиально не наблюдаемые в свободном состоянии по отдельности. Понятие составной частицы не обязательно означает возможность разделить ее на составляющие. Такого не было ни у атома, ни у ядра.

## Реальность глюонов и кварков

Если глюоны и кварки отсутствуют в свободном состоянии вследствие эффектов конфайнмента цветового заряда, то можно ли их рассматривать как реальные объекты? Можно ли назвать кварки и глюоны составляющими частицами, если адрон принципиально нельзя на них разделить?

На протяжении нашей книги мы уже проследили изменение представления о частицах. Частицы могут



Рис. 20. При электрон-позитронной аннигиляции в адроны можно было бы ожидать равномерного распределения вылета рождающихся адронов по всем направлениям. Однако такая картина получалась только при наложении большого числа отдельных процессов аннигиляции

рождаться и уничтожаться. Могут превращаться друг в друга. Могут быть нестабильными и распадаться на другие более легкие частицы. Важно, чтобы у частиц были определенные характеристики (спин, масса, электрический заряд, ...). Важно, чтобы мы могли наблюдать следы их образования. Кварки и глюоны имеют определенные характеристики. Кварки и глюоны можно назвать частица-

ми, поскольку имеются наблюдательные эффекты их существования на малых расстояниях. Эти эффекты проявляются в образовании струй адронов.

Если бы кварки реально не существовали, то рождающиеся в  $e^+e^-$ -аннигиляции адроны разлетались бы по разным направлениям, так что картина каждого отдельного события аннигиляции выглядела бы, как показано на рис. 20. Но если сначала образуются кварки и антикварки, разлетающиеся с большой энергией в противоположные стороны, то и образующиеся затем адроны должны разлетаться в том же направлении, в котором первоначально летели кварк и антикварк. Кварк и антикварк выступают в роли шланга, направляющего движение двух адронных струй, или в роли концов каната, который натягивается и разрывается.

Кварк и антикварк могут разлетаться под разными углами относительно направления движения сталкивающихся электрона и позитрона. Но в каждом отдельном событии аннигиляции направление разлета

кварка и антикварка фиксировано. Это направление и определяет направление разлета струй адронов. Если собрать все события  $e^+e^-$ -аннигиляции и наложить одно на другое, мы получим ту же картину, что и на рис. 20. Но в каждом отдельном событии мы имеем не равномерное распределение адронов по всем углам, а концентрацию всех адронов, рождаемых в данном событии, вдоль одного направления. Имеем две разлетающиеся в противоположные стороны

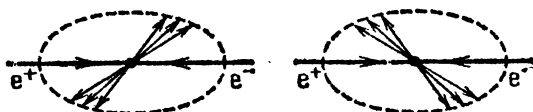


Рис. 21. В каждом отдельном процессе аннигиляции преимущественно рождаются струи адронов, разлетающиеся в противоположные стороны под определенным углом к аннигилирующим электрону и позитрону. Наложение друг на друга большого числа отдельных событий аннигиляции дает картину, изображенную на рис. 20

адронные струи (рис. 21). Именно такую двухструйную картину, а не равномерное распределение адронов по всем углам (рис. 20) и наблюдают в эксперименте по  $e^+e^-$ -аннигиляции. Образование двух струй адронов в аннигиляции рассматривают поэтому как доказательство реального существования кварков.

Электрон и позитрон оставляют след в камере Вильсона, разбивая атомы на своем пути. Подобно этому струи адронов — это следы кварков в вакууме, рождающих по пути кварк-антикварковые пары.

Адронные струи наблюдают и в процессах глубоко-неупругого рассеяния лептонов на нуклонах и даже в процессах взаимодействия адронов. В последнем случае происходит большая передача импульса и энергии, так что процесс эффективно определяется взаимодействием отдельных кварков или глюонов. Экспериментально пока не удастся определить, образована данная струя кварком или глюоном. Однако то, что глюоны несомненно образуются и формируют адронные струи, было установлено в экспериментах по  $e^+e^-$ -аннигиляции.

Дело в том, что квантовая хромодинамика предсказывала, что с ростом энергии сталкивающихся электрона и позитрона возрастает относительная ве-

роятность того, что образующиеся в  $e^+e^-$ -аннигиляции кварк или антикварк могут испускать глюон под достаточно большим углом к направлению разлета кварка и антикварка \*). Вместо двух струй адронов в этом случае должны наблюдаться три струи адронов. По этому согласно квантовой хромодинамике следовало ожидать, что с повышением энергии сталкивающихся электронов и позитронов наряду с двухструйными событиями должно появляться и некоторое количество трехструйных событий. И в 1979 г. такие трехструйные события действительно были обнаружены. Открытие трехструйных событий служило доказательством существования глюонов.

Каждому типу взаимодействия частиц отвечает свой тип зарядов — источников поля соответствующего взаимодействия. Так оказалось возможным единообразно описать такие внешне разные взаимодействия, как электромагнитное, слабое и сильное. Но заряды слабого взаимодействия обладают еще одним специфическим свойством: несохранением пространственной четности.

### Четность

До 1956 г. все опыты, атомные и ядерные, казалось, подтверждали естественное предположение о зеркальной симметрии законов природы. Если и существуют несимметричные предметы, например, «правые» перчатки, то с тем же успехом можно изготовить и перчатку на левую руку. То же относится и к сложным органическим молекулам; великие химики XIX в. установили, что в органических молекулах

тип  $\begin{array}{c} R_2 \quad R_1 \\ \diagdown \quad / \\ C \\ / \quad \diagdown \\ R_3 \quad R_4 \end{array}$ , где  $R_1, R_2, R_3, R_4$  — разные атомы или

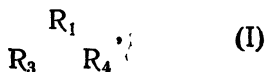
разные группы атомов, эти группы располагаются по углам тетраэдра (пирамиды с треугольным основанием (рис. 22)), в центре которого находится атом углерода C.

---

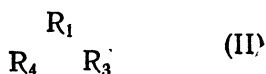
\*) Глюоны электронейтральны и не имеют взаимодействия с электромагнитными квантами, электронами и позитронами. В  $e^+e^-$ -аннигиляции глюоны могут образовываться только после рождения пары кварк — антикварк.



Представим себе тетраэдр, поставленный на плоскость так, что  $R_1$  находится над плоскостью. Остальные 3 группы могут располагаться либо, как показано на рис. 22, I, либо, как показано на рис. 22, II. Этим двум разным расположениям соответствуют 2 разные молекулы (I) и (II). Никакими поворотами их нельзя сделать одинаковыми. Различие не связано с тем, что мы выделили группу  $R_1$  и поместили ее вверх. Мы могли бы поместить вверх группу  $R_2$ . Тогда в первом случае в основании окажутся



а во втором —



В растениях и животных мы находим только одну форму, которую можно записать в виде, изображенном на рис. 23.

Однако химики умеют синтезировать и выделять в чистом виде также и другую форму, соответствующую двум переставленным группам. Легко убедиться, что, рассматривая I в зеркале, мы увидим изображение формы II; отличать одну форму от другой можно по форме кристаллов, которые при выпаривании можно отобрать пинцетом, как это впервые сделал Пастер. Формы можно отличать и по направлению вращения плоскости поляризации света.

Опыты подтверждают точное равенство энергий левых и правых форм, следующее из теории. Этот вывод теории, основывающейся на квантовой механике и учитывающей электромагнитное (кулоновское) взаимодействие, связан с зеркальной симметрией. Взаимная замена левых (L) и правых (R) форм  $L \rightleftharpoons R$  не меняет предсказаний теории. В квантовой теории состояние  $(L + R)$  зеркально симметрично. При отражении в зеркале его волновая функция пе-

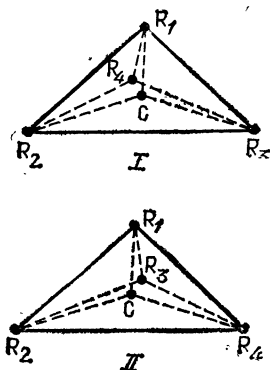


Рис. 22. Органическая молекула имеет форму тетраэдра. Вершины этого тетраэдра — сложные органические соединения  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ , а центр тетраэдра — атом углерода C

переходит сама в себя со знаком «+»:  $P(L+R) \rightarrow +(R+L)$ .

Поскольку дважды отразившись в зеркале объект останется самим собой,  $P^2 = 1$ ,  $P = \pm 1$  и все состоя-

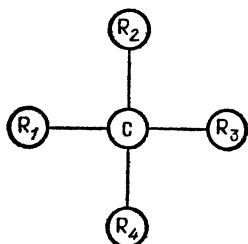


Рис. 23. Сложное органическое соединение, в котором атом углерода С связан с четырьмя соединениями  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$

ния атомов можно классифицировать по *четности*, они обладают либо  $P = +1$ , либо  $P = -1$ . В последнем случае речь идет о более высоколежащих состояниях  $(L-R)$ , волновые функции которых  $P(L-R) \rightarrow -(L-R)$ .

Когда мы говорим о перчатках на левую и правую руку, или о зеркально симметричных молекулах, мы имеем дело со *статической четностью*.

Если в зеркале отражается процесс, то речь идет о *динамической четности*. Оба аспекта (статический и динамический) можно проследить на примере штопора (шурупа или винта). Сам штопор обладает либо левой, либо правой винтовой нарезкой. При отражении в зеркале нарезка в штопоре меняется с правой на левую (рис. 24). Это статическая четность. Но ввинчивая штопор в пробку, мы будем совершать либо вращения по часовой стрелке (для правовинтового штопора), либо против часовой стрелки (в случае левовинтового штопора). Динамическая четность характеризует связь направления поступательного и вращательного движения штопора относительно пробки. Если мы ввинчиваем штопор в пробку, поворачивая его по часовой стрелке, то при зеркальном отражении этот процесс будет происходить при поворотах против часовой стрелки. В классическом случае (например, в случае штопора) соответствие динамической и статической четности взаимно однозначное. Это связано с тем, что нарезка в штопоре жестко фиксирована и однозначно определяет

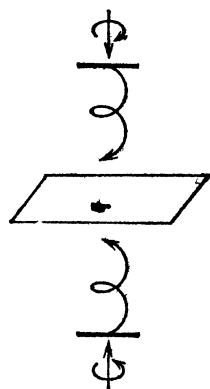


Рис. 24. При отражении в зеркале правовинтового штопора мы получаем левовинтовой штопор

направление вращения при ввинчивании в пробку, а, ввинчивая штопор, по направлению вращения мы однозначно определяем характер нарезки.

Но для элементарных частиц аналогия со штопором, вообще говоря, неправомерна. Электрон, летящий со спином, ориентированным по направлению движения, нельзя рассматривать как штопор с фиксированной нарезкой, поскольку направление движения «штопора» — электрона зависит от выбора системы отсчета. В случае электрона не существует пробки, позволяющей однозначно определить его нарезку. Так, перейдя в систему отсчета, движущуюся быстрее электрона, мы получим изменение характера нарезки «штопора» (рис. 25). Абсолютный характер «нарезки» сохраняется только для безмассовых частиц, скорость которых всегда равна скорости света. Для этих «спиральных» частиц спиральность  $\text{spc}/\hbar E$  (где  $s$  — спин, а  $p$  и  $E$  — импульс и энергия частицы) является сохраняющейся и не зависящей от системы отсчета характеристикой.

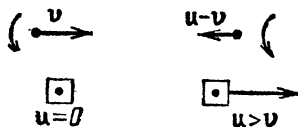


Рис. 25. Поскольку электрон обладает ненулевой массой, его скорость всегда меньше, чем скорость света и, в принципе, его можно обогнать, т. е. может существовать наблюдатель, движущийся быстрее, чем электрон. Тогда, если для покоящегося наблюдателя направление вектора спина совпадает с направлением движения электрона и электрон выглядит как правовинтовой, то для наблюдателя, скорость которого и превышает скорость движения электрона  $v$ , вектор спина направлен в сторону, противоположную направлению движения электрона, и электрон выглядит как левовинтовой.

Так, у фотона можно рассматривать как элементарные не две плоские, а две круговые поляризации. При переходе к другой системе отсчета лево- ( $L$ ) и право- ( $R$ ) поляризованные фотоны сохраняют свою круговую поляризацию. Это связано с тем, что масса фотона равна нулю, и скорость распространения света равна  $c$ . Поэтому можно говорить о разных частицах:  $L$ - и  $R$ -фотонах, причем различие между  $L$ - и  $R$ -фотонами не зависит от выбора системы отсчета.

Зеркальная симметрия электромагнитных процессов ведет, однако, к испусканию смешанных  $L$  и  $R$  и к переходу  $L \leftrightarrow R$  фотонов при их отражении в зеркале (при рассеянии) без «порчи» зеркала (электронов).

При высокой энергии существуют правые и левые электроны, но вследствие наличия массы такое деление не абсолютно. Чем ближе скорость частицы к скорости света, тем более точной становится для них аналогия со штопором и более строго можно говорить об их «нарезке». Сохранение четности (динамической) в электромагнитном взаимодействии означает, что «лево»- и «правовинтовые» электроны взаимодействуют одинаково, независимо от характера «нарезки».

При отсутствии массы разделение на правые и левые частицы со спином  $1/2$  строгое. Самое строгое разделение достигается уничтожением того, от чего хотят отделиться. Предположим, — не для электронов, а для нейтрино — что существует только один сорт нейтрино с  $spc/\hbar = -E$ , тогда масса их тождественно равна нулю. Они должны двигаться со скоростью  $c$ , чтобы не превратиться в нечто несуществующее. При этом абсолютное разделение левого и правого нейтрино обеспечивается нулевой массой нейтрино.

Нейтрино и антинейтрино *электронейтральны*, и тем не менее отличаются друг от друга \*). Значит, «заряд» нейтрино, а также отличие «зарядов» нейтрино и антинейтрино — это не электрическое явление, а нечто похожее на различия нейтрона и антинейтрона. Такие «заряды» нейтрино и антинейтрино можно отличить экспериментально, о чем мы еще расскажем.

### Несохранение четности

К середине 50-х гг. накопились серьезные трудности в теории распада  $K$ -мезонов. Такие распады происходят за счет слабого взаимодействия, и в 1956 г., обсуждая возможность решения этих трудностей, Т. Ли и Ч. Янг поставили вопрос о сохранении четности в процессах слабого взаимодействия. Они показали, что убедительных экспериментальных данных в пользу эквивалентности правого и левого в процессах слабого взаимодействия нет, что процесс слабого взаимодействия и тот же процесс, отра-

---

\*) Заряженная частица с массой, равной нулю, задала бы клопот! Она рождалась бы парами в сколь угодно слабом электрическом поле  $E$  с вероятностью  $\sim (e^2/\hbar c)^2 E^2/\hbar^4 c^3$  штук/(см<sup>3</sup>·с). При напряженности поля  $E = 1 \text{ CGSE} = 300 \text{ В/см}$  это дает чудовищное значение  $10^{72}$  штук/(см<sup>3</sup>·с). В таких условиях электротехника не могла бы существовать,

женный в зеркале, могут отличаться друг от друга. Они указали опыты, в которых такое отличие можно наблюдать. Эти опыты были поставлены. Гипотеза Ли и Янга подтвердилась.

В опыте Ц. Ву и ее сотрудников изучался  $\beta$ -распад ядер кобальта. Эти ядра были поляризованы. Спин ядер был ориентирован вдоль одного направления,

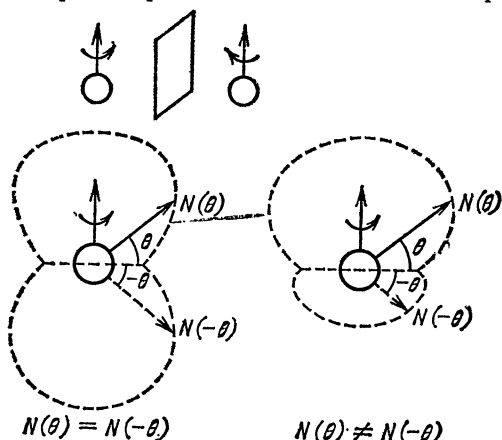


Рис. 26. При отражении в зеркале левополяризованное ядро выглядит как правополяризованное. Из сохранения четности следует, что при распаде поляризованного ядра число электронов  $N(\theta)$ , испущенных под углом  $+\theta$  к плоскости вращения ядра, равно числу электронов  $N(-\theta)$ , испущенных под углом  $-\theta$ . Установленное в эксперименте различие  $N(\theta)$  и  $N(-\theta)$  подтверждало несохранение четности в слабом взаимодействии

Исследовалось, с какой вероятностью вылетают электроны под разными углами относительно оси ориентации спинов. Спин ядра — это момент его внутреннего вращения. Естественно, что вдоль оси вращения и перпендикулярно этой оси (в плоскости вращения) электроны должны вылетать с разной вероятностью вследствие действия центробежных сил. Но если четность сохраняется, то вращение ядра влево и вращение его вправо (против часовой стрелки или по часовой стрелке в плоскости вращения — см. рис. 26) должно приводить к одному и тому же распределению по углу вылетающих при  $\beta$ -распаде электронов. Эти два случая — вращения ядра по и против часовой стрелки — получаются один из другого при их отражении в зеркале. В теории, в которой сохраняется

четность, картина процесса не должна измениться, если его отразить в зеркале. Под одинаковыми углами к плоскости вращения должно вылетать одинаковое число электронов как вверх, так и вниз (рис. 26).

В самом деле, чем отличается процесс распада и этот же процесс, отраженный в зеркале? Тем, что один процесс мы описываем в «левой» системе координат  $X, Y, Z$ , а другой — в «правой»  $Y, X, Z$ . В левой системе координат поворот по кратчайшей дуге, при котором ось  $X$  совмещается с осью  $Y$ , происходит против часовой стрелки (рис. 27). В правой — по часовой

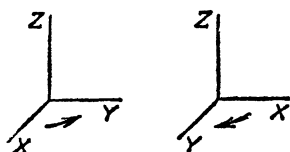


Рис. 27. Левая и правая системы координат отличаются направлением поворота по кратчайшей дуге от оси  $X$  к оси  $Y$

стрелке (рис. 27). Любому процессу и его отражение в зеркале отличаются только тем, что при их описании мы должны сменить левую систему координат на правую. А все отличие этих двух систем в том, что мы меняем местами ось  $X$  и ось  $Y$ . Вот почему сохранение четности представлялось для физиков таким естественным.

Но в опыте Ц. Ву было надежно установлено, что процесс  $\beta$ -распада и его отражение в зеркале выглядят по-разному. Оказалось, что если смотреть со стороны направления, в котором вылетает больше электронов, то поляризованное ядро вращается по часовой стрелке. В этом и других опытах, поставленных почти одновременно, было установлено, что слабое взаимодействие явно предпочитает левую систему координат правой. Что в слабом взаимодействии участвуют только «левовинтовые» частицы.

Нейтрино рождаются только в процессах слабого взаимодействия (например, в  $\beta$ -распаде). Это значит, что во всех известных процессах взаимодействия нейтрино участвуют только «левовинтовые» нейтрино. Правовинтовые нейтрино, если и существуют, в наблюдаемых процессах не проявляются. Существование нейтрино только левой спиральности еще одна сторона несохранения четности.

Это открытие сотрясало все основания физики. Казалось невероятным, что Природа знает, какая ось должна быть названа осью  $X$ , а какая — осью  $Y$ . (При данном направлении оси  $Z$ : изотропия — возможность поворота любого трехмерного объекта остается!) Это

отчетливо понимали сами Ли и Янг. В заключение своей классической работы, за которую они были удостоены Нобелевской премии, авторы явно указывали на эту проблему.

В самом деле, когда мы говорим о вращении, то представляем себе ось. С одной стороны оси мы наблюдаем вращение по часовой стрелке, с другой — против часовой стрелки. Поэтому, когда мы говорим об определенном направлении вектора вращения (см. Математическое дополнение, с. 187), то в этом определении всегда присутствует условность, потому что все часы условились делать одинаковыми.

Естественно было бы, если бы ядро испускало преимущественно по экватору — это можно было бы понять как эффект центробежной силы. Можно придумать вращающееся тело, симметричное по оси в обе стороны. Однако испускание преимущественно в одну сторону кажется неестественным. Опыт с распадом поляризованного ядра можно было бы поставить гораздо раньше — а не ставили, потому что считали, что тривиальный результат гарантирован.

Действительно, если бы речь шла об электродинамике и сильном взаимодействии, то опыт подтвердил бы симметрию правого и левого:  $\alpha$ -распад ядер, вращающихся в определенную сторону, симметричен, и электромагнитное излучение вращающегося атома симметрично.

Несимметрия в живой природе — это исключение, загадка, связанная с происхождением жизни. Напомним, что в неживой природе правый и левый сахар одинаковы. Связаны ли две загадки —  $\beta$ -распад и живое, и если связаны, то каков механизм связи — это дело будущего.

### Возможен ли зеркальный мир?

Выделение левой системы координат связано со свойством слабого взаимодействия тех частиц, которые нас окружают. Если у каждой частицы есть в «зазеркалье» двойник, то, отражая процесс в зеркале, мы должны рассматривать именно зеркальные двойники обычных частиц. Должны существовать зеркальные протоны, электроны, нейтроны и нейтрино. Отражая в зеркале ядро, мы получаем «зеркальное» ядро (не зеркальные ядра, в которых поменялись ме-

стами нейтроны и протоны, — а ядро, состоящее из новых частиц — зеркальных нейтронов и протонов). Отражая в зеркале процесс  $\beta$ -распада, мы должны рассматривать распад зеркального ядра, при котором рождаются зеркальный электрон и зеркальное нейтрино. Тогда  $\beta$ -распад ядра выделяет левую систему координат, а « $\beta$ -распад» зеркального ядра выделял бы правую систему координат.

Между частицами и их зеркальными двойниками должна быть строгая симметрия. Они должны взаимно дополнять друг друга так, чтобы с учетом их симметрии эквивалентность левой и правой систем координат восстанавливалась. С другой стороны, при строгой симметрии законов необходимо было объяснить, почему в окружающем нас мире зеркальных частиц мало (или совсем нет). Для этого требовалось запретить в теории превращение обычных частиц в зеркальные.

Советский физик-теоретик Л. Д. Ландау предложил «экономный» путь спасения эквивалентности правого и левого. Зачем вводить в теорию новые частицы зазеркалья, если у частиц и так уже есть двойники — античастицы? Не могут ли античастицы выполнить роль зеркальных двойников?  $\beta$ -распад ядер выделяет левую систему координат,  $\beta$ -распад ядер антивещества — правую. Если процесс  $\beta$ -распада отразить в зеркале и в отраженном процессе заменить все частицы на их античастицы, то симметрия левого и правого восстанавливается. Зазеркалье надо комбинировать с антимиром. Возникла идея о новой строгой симметрии, которой должно подчиняться и слабое взаимодействие, идея комбинированной четности.

Предполагалось, что четность — точная симметрия гравитационного взаимодействия и электромагнитного взаимодействия, а комбинированная четность — строгая симметрия слабого взаимодействия. Но через несколько лет в опытах с распадами нейтральных  $K$ -мезонов выяснилось, что комбинированная четность также не является строгой симметрией Природы. Это вновь нарушало симметрию левого и правого. Грандиозные следствия нарушения комбинированной четности удалось полностью оценить только почти двадцатилетие спустя, когда была осознана связь этого явления с наличием вещества и отсутствием антивещества.



щества в окружающей нас части Вселенной. Но об этом позже.

Несохранение комбинированной четности сделало особо актуальным вопрос о зеркальных двойниках обычных частиц. Зеркальные частицы не должны обладать сильным (ядерным) и электромагнитным взаимодействием, иначе их существование уже давно проявлялось бы в экспериментах. Но даже если взаимодействие между зеркальными и обычными частицами настолько слабое, что процессы с участием зеркальных частиц даже в отдаленном будущем не смогут стать предметом прямого исследования физики микромира, поиск макроскопических проявлений частиц возможен уже в настоящее время.

Полная симметрия свойств обычных частиц и их зеркальных двойников обеспечивает и симметрию их взаимодействий. Зеркальные частицы обладают своими (зеркальными) сильным, слабым и электромагнитным взаимодействиями, так что зеркальные нуклоны могут связываться в зеркальные ядра, которые, в свою очередь, могут соединяться зеркальным электромагнитным взаимодействием в зеркальные атомы. Тем самым возможно существование зеркального вещества, столь же стабильного, как и обычное. Практически только гравитационное взаимодействие является общим для зеркальных и обычных частиц.

Гравитационное влияние объектов из зеркального вещества на астрономические объекты из обычного вещества делает существование зеркального вещества доступным наблюдательной проверке. На основе современных представлений об эволюции вещества во Вселенной можно ответить на вопросы о том, что должно было происходить с зеркальным веществом в ходе такой эволюции, к образованию каких астрономических объектов из зеркального вещества она должна была бы привести, и каковы возможные наблюдательные эффекты существования зеркального вещества во Вселенной.

При полной симметрии свойств зеркального и обычного вещества ответы на эти вопросы оказываются довольно определенными.

В этом случае во Вселенной должно быть равное количество зеркального и обычного вещества и в галактиках и скоплениях галактик должно быть приблизительно одинаковое количество объектов из обыч-

ного и зеркального вещества. С другой стороны, современные представления об образовании и эволюции звезд и звездных скоплений приводили к выводу о независимом образовании объектов из обычного и зеркального вещества. В среднем в Галактике должно быть одинаковое количество зеркальных и обычных звезд, одинаково их распределение по массам и скоростям, но сами эти объекты — практически «чистые». Обычная звезда должна содержать очень малую примесь зеркального вещества, и, наоборот, в зеркальной звезде должна содержаться очень малая примесь обычного вещества.

Наличие в видимой области галактик гравитирующей массы, вдвое превышающей видимую массу, — жесткое предсказание гипотезы зеркального мира. Причем распределение по массам и по скоростям объектов невидимой массы (зеркальных звезд, облаков зеркального газа и т. п.) должно быть таким же, как для видимого вещества. Специалисты еще не вынесли согласованного мнения о существовании такой «локальной скрытой массы» (в отличие от общепринятой скрытой массы в больших масштабах — см. гл. «Гравитация»). Одна группа астрономов утверждает, что в видимой области Галактики, и, в частности, близкой к Солнечной системе, скрытой массы в таком количестве нет. По их мнению, с точностью не хуже 10 % полная плотность вещества в видимой области Галактики совпадает с плотностью видимого вещества — в основном звезд и межзвездного газа. Однако есть и другая группа астрономов, которые утверждают, что согласованное описание распределения звезд в Галактике с необходимостью требует присутствия в видимой области Галактики «локальной скрытой массы». Результаты этих специалистов согласуются с предсказаниями, сделанными на основе гипотезы зеркального вещества.

Можно указать еще целый ряд астрономических эффектов зеркального вещества, доступных проверке в наблюдениях. В их числе — возможность образования внутри Солнца планеты из зеркального вещества. Образование такой планеты обусловлено динамикой межзвездного зеркального газа и пыли, захватываемых Солнечной системой, и не является необходимым следствием существования зеркального мира. Однако если в гравиметрических измерениях будет

подтверждено движение такой планеты внутри Солнца, значение этого факта трудно будет переоценить.

Так изучение физической природы несохранения четности в физике микромира может повлечь за собой грандиозные астрономические следствия.

### Лептонные заряды

Исследование распадов мюона, пионов, странных частиц, изучение реакций взаимодействия нейтрино показали, что  $\beta$ -распад оказался только первым представителем большого класса процессов *одного и того же* так называемого *слабого взаимодействия*, для которого несохранение четности является фундаментальным законом. На языке спиральных частиц это означает, что в процессах слабого взаимодействия участвуют преимущественно левополяризованные частицы и правополяризованные античастицы. Так, например, в процессах слабого взаимодействия левополяризованное нейтрино превращается в левополяризованный электрон, а правополяризованное антинейтрино — в правополяризованный позитрон \*) и имеют место реакции

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-, \quad (A)$$

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+. \quad (B)$$

При этом реакция (A) вызывается только нейтрино  $\nu_e$ , а антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  вызывает только реакцию (B). Реакция (A) за счет  $\bar{\nu}_e$  с образованием правополяризованного электрона не наблюдалась, и, наоборот, не наблюдалась реакция (B), вызываемая  $\nu_e$ . Об этом различии превращений  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$  иногда говорят как о различии *лептонных зарядов*  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$ . Нейтрино  $\nu_e$  и электрону приписывают лептонный заряд  $+1$ ; а позитрону и  $\bar{\nu}_e$  — заряд  $-1$ . Тогда свойства превращений лептонов объясняются сохранением лептонного заряда.

Однако одного лептонного заряда оказалось недостаточно. В нейтринных экспериментах было установлено, что нейтрино, образующееся вместе с мюоном  $\mu$ , мюонное нейтрино  $\nu_\mu$  в реакции типа (A) всегда

---

\*) Кварки также участвуют в слабом взаимодействии только левополяризованные, и это обуславливает влияние поляризации ядра на слабые процессы.

превращается в  $\mu^-$ , тогда как  $\nu_e$  превращается в этой реакции в  $e^-$ . Даже при нулевой массе свойства электронного  $\nu_e$  и мюонного  $\nu_\mu$  нейтрино различны. Эти различия объясняют различием в лептонных зарядах  $\nu_\mu$  и  $\nu_e$ , а именно,  $e^-$  и  $\nu_e$  ( $e^+$  и  $\bar{\nu}_e$ ) обладают электронным лептонным зарядом, а  $\mu^-$  и  $\nu_\mu$  ( $\mu^+$  и  $\bar{\nu}_\mu$ ) — мюонным лептонным зарядом. Между лептонами электронного типа ( $e^-, \nu_e, e^+, \bar{\nu}_e$ ) и лептонами мюонного типа ( $\mu^-, \nu_\mu, \mu^+, \bar{\nu}_\mu$ ) имеется симметрия. В соответствии с этой симметрией определяются и *мюонные заряды*:  $\mu^-$  и  $\nu_\mu$  имеют мюонный заряд  $+1$ ,  $\mu^+$  и  $\bar{\nu}_\mu$  — заряд  $-1$ .

Выбор того, что в паре частица — античастица называть частицей, а что — античастицей, условен. Но, условившись называть частицей электрон, с помощью лептонных зарядов, сохраняющихся в превращениях лептонов, можно установить, какой лептон является частицей, а какой — античастицей. Так, из сохранения электронного лептонного заряда следует, что частица, рождающаяся вместе с электроном при  $\beta$ -распаде должна иметь отрицательный лептонный заряд, т. е. являться античастицей — антинейтрино  $\bar{\nu}_e$ . Наоборот, при  $\beta^+$ -распаде вместе с позитроном, обладающим отрицательным лептонным зарядом, должна рождаться частица с положительным лептонным зарядом — нейтрино,  $\nu_e$ . Симметрия между лептонами электронного и мюонного типа позволяет определить как частицу, отрицательно заряженный мюон. Тогда из сохранения лептонного заряда следует, что в распаде

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

рождается нейтрино  $\nu_\mu$ , а в распаде

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

рождается античастица — мюонное антинейтрино  $\bar{\nu}_\mu$ .

Обсуждавшиеся лептонные заряды \*) отличаются от электрического заряда тем, что с этими зарядами не связано поле взаимодействия. Сохранение этих зарядов отражает только сохранение числа частиц определенного сорта. Поэтому электронный и мюонный

---

\*) После открытия  $\tau$ -лептона, в распадах которого наблюдают эффекты существования третьего,  $\tau$ -нейтрино  $\nu_\tau$ , был введен и третий лептонный заряд, связанный с  $\tau$  и  $\nu_\tau$ .

лептонные заряды называют просто *сохраняющимися числами*. Подлинные заряды слабого взаимодействия — это заряды превращения  $\nu_e$  в  $e^-$ ,  $\nu_\mu$  в  $\mu^-$  и т. д. — источники полей слабого взаимодействия. Эти заряды оказываются тесно связанными с симметрией изоспина.

### Поле слабого взаимодействия

Долгое время слабое взаимодействие рассматривалось как 4-фермионное и казалось совершенно непохожим на электромагнитное. Однако в 50-е годы были замечены черты аналогии: 4-фермионное взаимодействие есть прямое, непосредственное поле взаимодействия двух слабых токов перехода. Теоретически более привлекательным казался путь рассматривать такое взаимодействие как низкоэнергетический предел взаимодействия, подобного электромагнитному, но с очень большой массой кванта поля взаимодействия. Чтобы элементарное взаимодействие тока (и заряда) слабого перехода с квантом поля слабого взаимодействия характеризовалось той же константой, что и аналогичный элементарный акт электромагнитного взаимодействия, требовалось, чтобы масса кванта слабого взаимодействия была порядка 100 ГэВ. Кроме того, кванты слабого поля электрически заряжены. Из этого выросла современная теория слабого взаимодействия, подробно обсуждаемая в книге Л. Б. Окуня «а $\beta$ у ... Z».

Выделим некоторые характерные черты этой теории. Рассмотрим электрон и электронное нейтрино. Это две разные частицы. Электрон электрически заряжен. Нейтрино электрически нейтрально. Но все же это очень схожие частицы. Это два лептона. Они имеют одно и то же лептонное электронное число. Наверняка для них все различия связаны с тем, что электрон — электрически заряжен, а нейтрино — нет. Но тогда эта пара совсем похожа на пару протон — нейтрон. Эти две частицы (электрон и нейтрино) можно рассматривать как разные состояния одного лептонного поля.

Положим в основу теории *неразличимость зарядовых компонент* лептонов. Тем самым мы попадаем в «зарядовое пространство», в пространство лептонного

изоспина. Всевозможные переходы между лептонами — источники поля слабого взаимодействия.

Теория Глешоу — Вайнберга — Салама вводит четыре типа полей взаимодействия лептонов.

Два поля,  $W^+$  и  $W^-$ , связаны с квантовыми переходами, в которых электрический заряд лептонов меняется. В квантовом переходе электрон — нейтрино (или антинейтрино — позитрон) должен рождаться отрицательно заряженный квант  $W^-$ . В квантовом переходе нейтрино — электрон (или позитрон — антинейтрино) должен испускаться положительно заряженный квант  $W^+$ . В таких переходах заряд лептона меняется — это заряженные слабые токи перехода. Такие токи появлялись еще в теории Ферми (только без учета несохранения четности), входили в теорию универсального слабого взаимодействия. Но теперь эти токи прямо не взаимодействуют с другими слабыми токами. Слабое взаимодействие передается опосредованно через заряженное поле слабого взаимодействия, т. е. через рождение и поглощение квантов этого поля, промежуточных бозонов слабого взаимодействия  $W^-$  и  $W^+$ .

Третье поле — это поле электромагнитного взаимодействия электрически заряженных лептонов. Оно появляется в теории Глешоу — Вайнберга — Салама наряду с полями слабого взаимодействия.

Но появлялось еще и четвертое поле, связанное с переходами нейтрино — нейтрино и электрон — электрон. В токах этих квантовых переходов электрический заряд частицы не меняется. Это нейтральные токи, подобные нейтральному электромагнитному току. В электромагнитном токе электрический заряд тоже не меняется. Только электромагнитный ток — источник электромагнитного поля. А нейтральные токи слабого взаимодействия — источники электрически нейтрального  $Z$ -поля.

$Z$ -поле взаимодействует с нейтрино. Электромагнитное поле — нет.  $Z$ -поле по-разному взаимодействует с левовинтовыми и правовинтовыми электронами, так что это взаимодействие нарушает четность. Электромагнитное поле взаимодействует с левовинтовыми и правовинтовыми электронами одинаково. В электромагнитном взаимодействии четность сохраняется. Взаимодействие нейтральных токов, связанных с полем  $Z$ , — новый тип слабого взаимодействия.

Это было первым важным предсказанием теории Глешоу — Вайнберга — Салама. Предсказывался новый тип слабых переходов, в которых заряд частицы не менялся, а четность нарушалась. Как должны проявляться эти переходы?

### Нейтральные токи

Наиболее яркие наблюдательные следствия существования нейтральных токов предсказывались при обобщении теории Глешоу — Вайнберга — Салама на мир нуклонов.

Наряду с опосредованным  $W$ -полем способом описания старых известных типов процессов (например,  $\beta$ -распада) предсказывались новые типы слабых процессов, в которых должно было проявляться существование поля  $Z$ .

Здесь надо заметить, что о возможном существовании  $W$ -кванта физики говорили еще задолго до появления теории Глешоу — Вайнберга — Салама. Говорили, исходя просто из аналогии с фотоном. Есть фотон — частица поля электромагнитного взаимодействия. Почему бы не быть и  $W$ -бозону — частице поля слабого взаимодействия.

Так же, задолго до появления теории Глешоу — Вайнберга — Салама, еще на уровне представления о непосредственном взаимодействии слабых зарядов и токов обсуждалась возможность существования взаимодействия нейтральных слабых токов. И еще с тех пор физики стали обсуждать, как это взаимодействие могло бы проявиться.

Во-первых, должен был бы наблюдаться новый тип взаимодействия нейтрино. В пучках энергичных нейтрино, создаваемых на ускорителях, наряду с процессами обычного слабого взаимодействия, в которых нейтрино превращается в заряженные лептоны, должны были бы наблюдаться события нового типа: В этих процессах начальное нейтрино уничтожалось бы во взаимодействии с нуклонами, но вместо заряженного лептона снова рождалось бы нейтрино, т. е. процессы упругого и неупругого рассеяния нейтрино без его превращения в заряженный лептон.

Во-вторых, появлялся бы новый тип взаимодействия между электронами и ядрами атома — из-за взаимодействия слабых нейтральных токов электронов и

нуклонов. Несохранение четности во взаимодействии нейтральных токов приводило бы к неодинаковому взаимодействию с ядрами левовинтовых и правовинтовых электронов. Эта возможность обсуждалась еще в конце 50-х гг. Из-за неодинакового взаимодействия с ядром правовинтовых и левовинтовых электронов должно наблюдаться слабое вращение поляризации света в атомах, невозможное, если между электронами и ядром действуют только электромагнитные силы.

До 1973 г. предсказание Z-взаимодействия казалось недостатком теории Глешоу — Вайнберга — Салама, но в 1973 г. рассеяние нейтрино за счет нейтральных токов было обнаружено. Однако и после открытия нейтральных токов во взаимодействии нейтрино эта теория не была принята. Некоторое время дело осложнялось тем, что в опытах американских и английских физиков-экспериментаторов не наблюдалось предсказываемое теорией Глешоу — Вайнберга — Салама вращение поляризации света, обусловленное неодинаковым взаимодействием левовинтовых и правовинтовых электронов с ядрами атомов. Появлялось много моделей единого электрослабого взаимодействия. Эти модели вводили новые типы лептонов и кварков, привлекали новые типы их взаимодействия для того, чтобы левые и правые электроны взаимодействовали с ядром одинаково. Опровергнуть эти новые модели можно было только экспериментально.

Советские физики провели в Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР эксперимент по поиску вращения поляризации света в парах висмута. В отличие от результатов американских и английских физиков, они наблюдали эффект вращения поляризации, т. е. наблюдали эффект, вызываемый несохранением четности во взаимодействии слабых нейтральных токов электронов и нуклонов. По величине и знаку эффект совпадал с предсказанием теории Глешоу — Вайнберга — Салама.

Эксперимент в Новосибирске блестяще подтверждал предсказания теории Глешоу — Вайнберга — Салама. Вскоре пришли и другие подтверждения несохранения четности во взаимодействии нейтральных токов. В рассеянии энергичных электронов на ядрах наблюдалось различие взаимодействия право- и лево-



винтовых электронов. Такое различие отвечало ожиданиям теории Глешоу — Вайнберга — Салама.

В 1979 г. Вайнберг, Салам и Глешоу были удостоены Нобелевской премии.

### Реальность W- и Z-бозонов

На основе теории Глешоу — Вайнберга — Салама было предсказано, что слабое взаимодействие осуществляется за счет обмена W- и Z-промежуточными бозонами — квантами поля слабого взаимодействия.

Вероятность процесса слабого взаимодействия определяется в теории Глешоу — Вайнберга — Салама величиной, пропорциональной  $[e^2/M_W^2]^2$ , где  $M_W$  — масса W-бозона. Сравнивая эту величину с соответствующей величиной, определяемой из вероятности  $\beta$ -распада нейтрона (или распада мюона), можно было однозначно предсказать значение массы W-бозона, а из вероятности взаимодействия нейтральных токов — массы Z-бозона. Из-за большой массы бозонов W- и Z-взаимодействия и оказываются слабыми.

Существование фотонов буквально «очевидно» — мы убеждаемся в этом, открывая глаза их потокам. Существование W- и Z-бозонов было далеко не так просто установить. Из-за большой массы W- и Z-бозонов требуется очень большая энергия частиц, в столкновениях которых эти бозоны рождаются. Более того, родившись с такой затратой энергии, W- и Z-бозоны долго существовать не могут. Вследствие своей большой массы они распадаются на более легкие частицы. Например, W-бозон распадается на  $e^-\bar{\nu}_e$ , а Z — на пару  $e^+e^-$ . Время, за которое поток частиц уменьшается в  $e$  раз из-за их распада, называется в физике *временем жизни* этих частиц. Время жизни W- и Z-бозонов оказывается очень малым. Оно меньше, чем  $10^{-24}$  с. Поэтому непосредственно наблюдать W и Z невозможно. Их кратковременное существование отражается только в появлении продуктов их распада.

В начале 80-х гг. в Европейском центре ядерных исследований вступил в строй так называемый *коллайдер* — установка, в которой протоны и антипротоны разгонялись навстречу друг другу до энергии 270 ГэВ. Эта энергия намного превышает порог обра-

зования  $W$ - и  $Z$ -бозонов \*). События их рождения и распада нужно было выделить на фоне в сто миллионов раз большего числа событий рождения других частиц. Это оказалось возможным благодаря тому, что продукты лептонных распадов  $W$  и  $Z$ , рождающихся почти в покое, могут разлетаться под любыми углами к направлению сталкивающихся пучков протонов и антипротонов (рис. 28) и изолированы от адронных струй, а легкие частицы сохраняют направление движения, породивших их струй адронов.

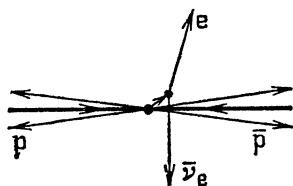


Рис. 28. Рождение  $W$ -бозона в столкновении протона  $p$  и антипротона  $\bar{p}$  на коллайдере наблюдали в событиях с одиночным электроном с большим импульсом и энергией, вылетающим под большим углом к сталкивающимся протону и антипротону. Поскольку  $\nu_e$  от распада  $W$ -бозона в эксперименте не регистрируется, большой импульс электрона от распада  $W$ -бозона оказывается нескомпенсированным

кулярном пучку направлении был не скомпенсирован, поскольку нейтрино в установке не наблюдалось. Рождение  $Z$  наблюдалось по рождению пары  $e^+e^-$  и  $\mu^+\mu^-$ .

Измеряя энергию и импульс продуктов распада  $W$  и  $Z$ , можно было установить массу этих частиц. Измеренные значения массы  $W$ - и  $Z$ -бозонов точно соответствовали предсказанию теории.

### Предсказанное очарование

Обобщение теории Глешоу — Вайнберга — Салама на случай странных частиц приводило к явному противоречию. При таком обобщении в тео-

\*) У порога их образования в столкновении  $p$  и  $\bar{p}$  вероятность образования  $W$  и  $Z$  ничтожна. Эта вероятность становится заметной, если энергия столкновения одного кварка из  $p$  и одного антикварка из  $\bar{p}$  достигает порога рождения  $W$  и  $Z$ .

рии предсказывалось Z-взаимодействие с нейтральными токами перехода странных частиц в частицы с нулевой странностью. Из-за таких нейтральных токов с изменением странности был бы возможен, например, распад  $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ , причем вероятность этого распада была бы сравнимой по величине с вероятностью наблюдаемого  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ -распада. На опыте распад  $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  не наблюдался и с вероятностью на 8 порядков меньшей.

Чтобы спасти теорию Глешоу — Вайнберга — Салама от проблемы нейтральных токов с изменением странности, в ней приходилось предположить существование новых частиц, в состав которых входит новый четвертый с-кварк — *очарованный кварк*, похожий на u-кварк, как s-кварк похож на d-кварк.

Как показали в 1970 г. Глешоу, Иллиопулос и Майани, существование четвертого кварка обеспечивает дополнительную симметрию между слабыми переходами. Квантовая механика дает в этом случае два пути превращения  $K^0$  в  $\mu^+ \mu^-$ , и интерференция этих каналов такая, что эффект резко уменьшается. Более того, сколько бы слабых переходов ни происходило в данном квантовом процессе, симметрия между токами переходов u и s, а также c и d обеспечит компенсацию переходов, вызывающих распады типа  $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ . Из-за разности масс u- и c-кварков компенсация не точная, но вероятность такого распада достаточно сильно подавлена.

Z-взаимодействие оказывалось чисто «диагональным». В теории Глешоу — Вайнберга — Салама нейтральные токи могли быть только процессами самопревращения частиц одного и того же типа, что и было подтверждено в эксперименте. Наблюдают нейтральные токи превращения  $e \rightarrow e$ , но не  $e \rightarrow \mu$  и т. п.

В отличие от странных частиц, существование очарованных частиц было теоретически предсказано, и их открытие в середине 70-х гг. (почти за десятилетие до открытия W и Z) подтвердило, что принцип «бритвы Оккама» не следует превращать в принцип экономии на частицах.

### Предварительные итоги

Теории сильного и слабого взаимодействия, построенные по аналогии с электродинамикой, составляют «жесткую сердцевину» наших современ-

ных знаний о микромире. Подведем некоторые итоги пятидесятилетнего развития этих представлений. По-видимому, прежде всего к таким итогам следует отнести углубление атомизма. Физика вышла на новый уровень фундаментального строения материи — на уровень составляющих нуклона — кварков. Другим важнейшим итогом является существование двух других, кроме электромагнитного, комплектов полей: слабого взаимодействия ( $W$  и  $Z$ ) и глюонов. Между всеми тремя типами фундаментальных полей взаимодействия теория выявляет сходство.

Так оказалось возможным единообразно описать все три фундаментальных взаимодействия. Все эти взаимодействия обусловлены обменами векторными бозонами (частицами поля со спином 1). Источником всех полей взаимодействия являются заряды и токи соответствующих переходов. Все взаимодействия имеют сходную структуру: все они вызываются локальным взаимодействием заряда или тока перехода с бозоном, отвечающим данному взаимодействию. Несмотря на отличие в наблюдательных проявлениях, связанное с разными массами бозонов или типом заряда (например, цвета), основные законы всех взаимодействий схожи.

С другой стороны, поля слабого и сильного взаимодействия имеют свою специфику. Большая масса  $W$ - и  $Z$ -бозонов, наличие цветового самодействия глюонов приводят к огромным различиям в проявлениях всех взаимодействий: слабости и короткодействию  $W$ - и  $Z$ -взаимодействий и к конфайнменту цвета, так что единственным дальнодействующим полем остается электромагнитное поле. Отличием оказалась также специфика  $W$ - и  $Z$ -взаимодействий по отношению к четности.

Фактическим идейным итогом, привнесенным в физику мучительными поисками последнего пятидесятилетия, стало выявление сходства в описании трех фундаментальных взаимодействий. В остальном современная теория представляет собой сочетание релятивизма и квантовой механики. Ничего принципиально нового в ней нет.

Массы электрона, мюона,  $\tau$ -лептона, кварков, заряды считаются в теории известными. Массы  $W$  и  $Z$  также, по сути дела, берутся из опытов. Значит, со-

временная теория элементарных частиц — это релятивистская теория частиц с заданными фундаментальными свойствами, связывающая одни экспериментальные данные с другими.

Такая теория принципиально не отличается от рассматривавшейся Гейзенбергом и Шредингером теории атома водорода, состоящего из электрона и протона, массы и заряды которых заданы.

Физикой пройдена очень важная ступень — но это ступень, а не вершина. Надо научиться вычислять массы частиц или хотя бы их отношения. Надо научиться вычислять безразмерные величины — заряды.

Характеризуя развитие физики за последние пятьдесят лет, следует, по-видимому, определить его как период, к которому не применимы слова Бора о «сумасшедшей теории» (см. с. 13). Даже такие, на первый взгляд «сумасшедшие», представления современной физики, как кварки или конфайнмент цвета, являются скорее «сумасшедшими результатами» весьма здравых теоретических построений, основанных на релятивистской квантовой теории взаимодействий, сходных по своей фундаментальной природе с электродинамикой.

Предсказание, которое потом подтверждается опытом, — высшая проверка теории. Открытие предсказанных теорией очарованных частиц, W- и Z-бозонов, кварковых и глюонных струй вселяет уверенность в надежность теорий Глешоу — Вайнберга — Салама и КХД.

Но нет сомнений в том, что развитие физики на этих теориях не кончается. И мы переходим к краткому наброску контуров такого развития, выходящего теоретической мыслью за пределы современного эксперимента.

### Великое объединение

Экстраполяция тенденций изменения констант теорий Глешоу — Вайнберга — Салама и КХД в область сверхвысоких энергий (см. подробнее в книге « $av\gamma \dots Z$ ») приводит к выводу, что при сверхвысоких энергиях все три взаимодействия можно описать одной константой (рис. 29). При этих энергиях

разные частицы можно рассматривать как разные состояния одной и той же частицы. Оказываются возможными любые переходы между частицами, между лептонами и кварками. Переходы между кварками различных цветов ведут к существованию цветового взаимодействия. Переходы между  $e$  и  $\nu_e$  ( $u$  и  $d$ ) — к существованию слабого взаимодействия. Но можно, отвлекаясь от масс, говорить об общем сходстве кварков и лептонов. Такое сходство позволяет ввести ранее неизвестные векторные взаимодействия, связанные с превращением кварков в лептоны или кварков в антикварки. Эти соображения подготовили почву для следующего шага в развитии идей физики.

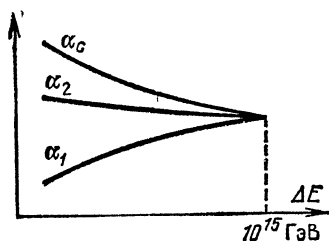


Рис. 29. Экстраполяция к очень большим переданным энергиям зависимости «бегущих» констант электро-слабого и сильного взаимодействия от передачи энергии приводит к пересечению всех трех констант (двух констант теории электрослабого взаимодействия  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ) и константы КХД  $\alpha_s$  в одной точке при энергиях  $10^{15}$  ГэВ

В теории, предложенной в 1975 г. Джорджи и Глешоу, предсказывались 24 типа различных переходов между частицами. 12 из них нам уже знакомы. Это переходы — источники электромагнитного поля, трех полей ( $W^-$ ,  $W^+$  и  $Z$ ) слабого взаимодействия и восьми цветовых состояний глюонного поля. Итого  $1 + 3 + 8 = 12$ . Но появляются еще 12 новых типов переходов между лептонами и кварками. Переходов, в которых не сохраняется по отдельности ни барионное,

ни лептонное число. Переходов — источников «баролептонных» полей, действие которых приводит к процессам превращения кварков в лептоны. Например, к превращениям  $u\bar{u} \rightarrow d\bar{e}^+$  или  $du \rightarrow \bar{\nu}d$  внутри протона. Из-за таких превращений, вызываемых действием «баролептонного» поля, могут осуществляться крайне маловероятные процессы распада протона  $p \rightarrow e^+\pi^0$  или  $p \rightarrow \pi^+\nu$ .

Кварк-лептонные переходы, источники баролептонных полей, в полную силу могут разыгрываться только при полной симметрии всех взаимодействий. Но такая симметрия может достигаться только при сверх-

высоких энергиях. Теория полагается инвариантной относительно всех типов переходов, но так как экспериментально известно, что кварк-лептонные переходы очень маловероятны, для объяснения нужно предполагать, что кванты баролептонного поля должны быть очень массивными. Их масса должна быть в  $10^{15}$  раз больше, чем масса протона, в  $10^{13}$  раз превышать массу W- и Z-бозонов — квантов поля слабого взаимодействия. Поэтому распад протона оказывается очень маловероятным. А время жизни — очень большим.

Поначалу все сходилась очень удачно для теории Джорджи — Глешоу. Точка пересечения всех констант отвечала энергии  $10^{15}$  ГэВ. Этим же значением характеризовалась и энергия покоя кванта баролептонного поля. Вероятность рождения такого кванта внутри протона была очень малой, отвечала времени жизни протона  $10^{31}$  лет.

К началу 80-х гг. ограничения на вероятность распада протона были более слабыми: из отсутствия наблюдаемых событий распада был установлен нижний предел на время жизни протона  $10^{30}$  лет.

Время жизни частицы — характеристика вероятности ее распада. Время жизни  $10^{31}$  лет означает, что в 10 тоннах вещества за год должен распасться один протон.

Казалось, близко уже и окончательное подтверждение теории Джорджи — Глешоу.

Детальный теоретический анализ ожидаемой вероятности распада протона показывал, что в этой теории время жизни протона не может превышать  $10^{31}$  лет. Физики обратились к большим объемам вещества и, окружив их детекторами, ожидали сигналов от продуктов распада. Но ожидания не оправдывались. К середине 1984 г. нижний предел на время жизни протона составил уже  $10^{32}$  лет. Теория Джорджи — Глешоу такому ограничению не удовлетворяла. Но, наверное, этому и не следует удивляться. Было бы странно, если бы простейший вариант далекой экстраполяции к сверхвысоким энергиям оказался абсолютно точным.

В своем рассказе мы подошли к сегодняшнему дню развития физики. С его надеждой на возможности

построения единой теории всех взаимодействий. Это пока надежда. Общепризнанной теории Великого объединения пока нет. Поэтому сейчас мы просто расскажем об одной красивой теоретической идее, к которой физики-теоретики постоянно возвращаются на протяжении последних 60 лет. Эта идея вселяет надежду на то, что может быть создана единая теория вообще всех фундаментальных взаимодействий, включая гравитацию.



Был этот мир глубокой тьмой окутан,  
Да будет свет! И вот явился Ньютоном,

Но сатана недолго ждал реванша,  
Пришел Эйнштейн — и стало все, как раньше,  
А. Поп, А. Эддингтон. (Переводы С. Маршака)

### Гравитационное поле. Факты

До сих пор мы не касались всемирного тяготения или, как принято говорить, *гравитации* \*). Тем самым был грубо (но сознательно) нарушен принцип исторически последовательного изложения.

Закон всемирного тяготения был четко сформулирован Ньютоном

$$F = \frac{G m_1 m_2}{r_{12}^2}.$$

Здесь  $F$  — сила, с которой действует на первое тело с массой  $m_1$  второе тело с массой  $m_2$ , находящееся на расстоянии  $r_{12}$  от первого тела. Далее,  $G$  есть так называемая *гравитационная постоянная*. Ее размерность есть  $l^3/mt^2$  ( $l$  — длина,  $m$  — масса,  $t$  — время). В единицах системы СГС  $G = 6,7 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$ , в единицах СИ  $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ .

Закон тяготения, по-видимому, был известен и до Ньютона. Пропорциональность силы величине  $m_1$  естественно следует из мысленного опыта с разбиванием первого тела на много ( $n$ ) кусков с массой  $m_1/n$ ; сила, действующая на все первое тело, равна сумме сил, действующих на его части. Аналогично получается и пропорциональность силы и массы  $m_2$ . Зависимость от расстояния считалась естественной — данная сила действует одинаково на единицу массы «любого» тела, находящегося на данном расстоянии, т. е. на поверхности шара радиуса  $r_{12}$  с центром во втором теле.

---

\*) От латинского слова *gravitatio*. Во французском и в английском языках значение корня слова раздваивается. С одной стороны, *gravitation* — тяготение, с другой стороны, *grave* — серьезный, важный.

Вполне естественно в таком случае, что величина силы обратно пропорциональна площади поверхности. Бесспорен приоритет Ньютона применительно к *следствиям* из закона тяготения. Ньютон рассчитал орбиты планет, на которые действует сила тяготения Солнца. Он показал, что законы Кеплера (и, в частности, движение планеты по эллипсу, в одном фокусе которого находится Солнце), являются следствием написанного выше закона тяготения. Сопоставление движения планет, находящихся на различном расстоянии от Солнца, с огромной точностью подтвердило зависимость силы тяготения от расстояния (множитель  $1/r^2$  в формуле).

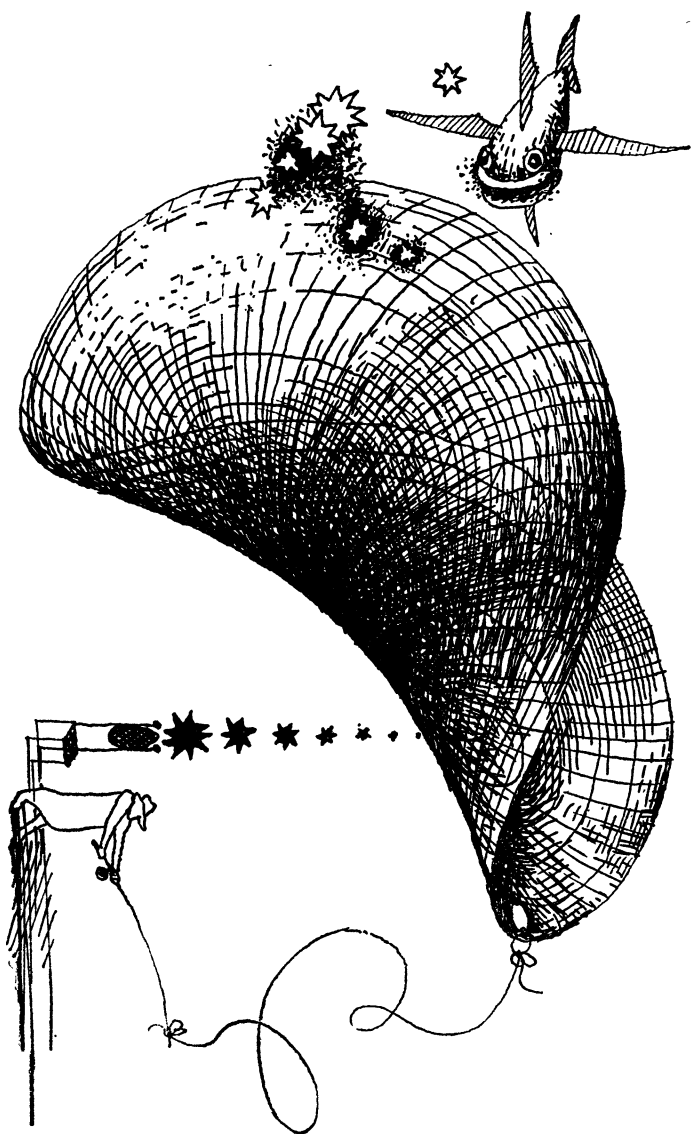
Однако в вычислениях входит только произведение  $GM_{\odot}$ , где  $M_{\odot}$  — масса Солнца. Движение Луны вокруг Земли зависит от  $GM$ , где  $M$  — масса Земли. Определить каждую из трех величин,  $G$ ,  $M_{\odot}$ ,  $M$ , в отдельности удалось лишь значительно позже. Только в 1798 г. Кавендиш сумел осуществить лабораторное измерение силы притяжения двух тел известной массы. Таким образом он определил значение постоянной  $G$ . Выше дано современное значение, мало отличающееся, впрочем, от результата Кавендиша. Поскольку произведения  $GM_{\odot}$  и  $GM$  были уже известны, стало возможным определение  $M_{\odot} = 1,98 \cdot 10^{33}$  г и  $M = 5,98 \cdot 10^{27}$  г. Современники говорили, что, наконец, взвешены Солнце, Земля и другие планеты.

Второй закон движения Ньютона состоит в том, что ускорение тела равно силе, действующей на тело, деленной на массу тела.

Отсюда следует, что ускорение первого тела  $a_1$  равно  $Gm_2/r_{12}^2$  и не зависит от его массы  $m_1$ . Этот вывод казался неправдоподобным: падение камня и падение пушинки происходит с очень различными скоростями и ускорением. Однако это различие связано с мешающим влиянием сопротивления воздуха, тормозящим пушинку и практически не действующим на камень. В вакууме ускорение камня и пушинки строго одинаково.

Вернемся к зависимости силы тяготения от массы. Если мы имеем дело с различным количеством одного и того же вещества, то пропорциональность силы и массы очевидна.

Но что будет, если сравнивать тяготение разных веществ?



Мы знаем, что масса обычного вещества приблизительно, с точностью не более 1—2 %, равна сумме масс протонов и нейтронов, из которых состоят ядра атомов, входящих в состав данного вещества. Поэтому естественно уточнить закон тяготения: действительно ли тяготение определяется именно массой тела, а не числом нуклонов. В настоящее время то, что тяготение вызывается именно *массой* тела, подтверждено с погрешностью не более  $10^{-12}$ !

В теории относительности доказано, что масса и энергия связаны соотношением  $E = mc^2$ . Из этого соотношения, в частности, следует представление о дефекте массы: когда протон и нейтрон соединяются в ядро дейтона D, происходит рождение гамма-кванта с энергией 2,2 МэВ. Энергия ядра D на соответствующую величину меньше суммы энергии протона p и энергии нейтрона n. Значит, и масса ядра D приблизительно на 0,24 % меньше суммы масс p и n. Величину  $m_p + m_n - m_D$  называют *дефектом массы*. Точные измерения массы атома гелия и атома водорода очень рано, до развития ядерной физики, позволили сделать смелый вывод об источнике звездной энергии. Тот факт, что атом гелия *приблизительно* в 4 раза тяжелее атома водорода, подсказывал возможность превращения четырех атомов водорода в один атом гелия. А то, что масса атома гелия все же на 0,6 %<sup>i</sup> меньше четырех атомов водорода, позволяло найти выделение энергии при таком превращении.

Но «вернемся к нашим баранам...»

Точные опыты установили, что сила тяготения зависит именно от массы — или, что то же, от полной энергии — тела, а не от числа протонов и нейтронов.

Тем самым с огромной точностью было доказано, что под действием «ньютоновской» силы тяготения все тела приобретают одинаковое ускорение. При данной начальной скорости и при отсутствии посторонних помех все тела движутся по одинаковым траекториям. Одно из следствий этого современный читатель не раз видел на экране телевизора. Космический корабль, космонавт внутри корабля и выпущенный им из рук карандаш — все они движутся по одной и той же траектории, с одинаковым ускорением. Но это значит, что относительно стенок корабля космонавт не движется, карандаш не движется относительно космонавта.

В кабине космонавта имеет место невесомость, сила тяготения не ощущается! Подчеркнем, что это происходит не за счет зависимости  $1/r^2$  в формуле тяготения. Если космический корабль летит на высоте 300 км от поверхности Земли, значит, его расстояние от центра Земли 6700 км (радиус 6400 км), величина  $1/r^2$  уменьшилась всего на 9—10 % по сравнению с ее значением на поверхности. Между тем, невесомость в кабине полная, сила тяготения внутри космического корабля выключается на все 100 % и происходит это вследствие того, что сам корабль летит по орбите с ускорением.

Эти очень простые соображения оказались существенными при развитии теории тяготения. Не относитесь с презрением к «простым» соображениям. Высшей похвалы заслуживают именно те исследователи, которые из простых, но твердо установленных фактов извлекают глубокие выводы.

### Гравитационное поле — теория Ньютона

Подытожим сказанное выше о законе всемирного тяготения. Обратим внимание прежде всего на то, что он формулируется в терминах дальнего действия и притом мгновенного. Сила, действующая на 1-е тело в данный момент времени  $t_0$ , зависит от массы и положения 2-го тела в тот же момент  $t_0$ . Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия отрицательна в соответствии с тем, что всегда имеет место притяжение. Можно ввести *гравитационный потенциал* и *гравитационное поле* данной массы. При этом окажется, что потенциал и поле в любой точке в данный момент определяются массой и ее положением в тот же момент. Налицо резкий контраст или, даже сильнее, несовместимость между электромагнитной теорией и теорией тяготения.

Электромагнитная теория характеризуется определенной скоростью распространения поля — скоростью света  $c$ . Созданная в 1905 г. теория относительности объявляет скорость  $c$  предельной и делает вывод о том, что пространство и время связаны друг с другом не так, как думали до начала XX в.

При переходе в движущуюся систему координат меняется течение времени, меняются длины, меняется понятие одновременности.

Между тем, теория Ньютона оперирует старыми, галилеевыми (или даже аристотелевыми) понятиями об отдельно существующих времени и пространстве.

После 1905 г. необходимость усовершенствования закона тяготения стала очевидной. Задачу эту решил Эйнштейн ценой 10 лет необычайно упорного и целеустремленного труда. При этом он избрал путь, внешне совершенно не похожий на теорию Максвелла. Эйнштейна вдохновляли два самых общих свойства тяготения. Первое — в свободно падающей кабине лифта имеет место невесомость. Другими словами: есть система координат, в которой силы тяжести или, иными словам, поле тяготения, как бы исчезает. Обратите внимание на то, что в теории Максвелла магнитное и электрическое поля преобразуются одно в другое, но не исчезают!

Эйнштейн сделал вывод, что можно построить такую теорию, в которой поле тяготения как таковое вообще не существует.

Тесно связанное с первым второе свойство состоит в том, что при наличии тяготения все самые разные по составу и массе тела могут двигаться по одной и той же траектории. Это свойство также отличается от движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях — такие частицы движутся по разным траекториям в зависимости от отношения заряда к массе.

Между тем, движение частиц под действием тяготения больше всего напоминает их движение в свободном пространстве, без каких-либо сил. В этих условиях любое тело движется с постоянной скоростью  $v = \text{const}$ ;  $x = x_0 + v(t - t_0)$ , есть решение уравнений движения *любого* тела.

При наличии тяготения движение более сложное, но одинаковость закона движения разных тел сохраняется (разумеется, при отсутствии других сил).

Снова мы видим сходство между свободным движением и движением в поле тяготения. Снова Природа намекает на возможность не вводить поле тяготения как таковое.

Эйнштейн предложил неожиданное замечательное решение: он предложил рассматривать неплоский искривленный комплекс пространства и времени.

Идея возможности (в смысле логической непротиворечивости) искривленного трехмерного пространства восходит еще к Лобачевскому, Больяи и Риману.

Для двумерного многообразия идея кривизны элемен-

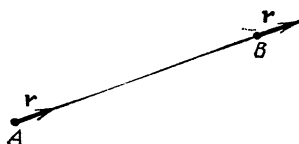


Рис. 30. Параллельный перенос вектора  $r$  по прямой из точки  $A$  в точку  $B$

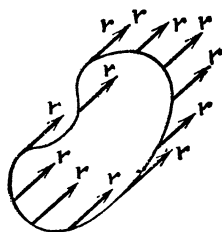


Рис. 31. Параллельный перенос вектора  $r$  по замкнутому контуру на плоскости

тарна. Плоскость представляет собой пример двумерного многообразия. Очевидно, что на плоскости можно взять двумерный вектор; понятие параллельного переноса вектора также наглядно. Передвигаясь по направлению вектора и перенося этот вектор параллельно ему самому, мы начертим на плоскости прямую (рис. 30). Прямая является линией, соединяющей две точки по кратчайшему расстоянию. Далее, на плоскости можно параллельно переносить вектор вдоль замкнутой кривой (рис. 31). В исходную точку он вернется с тем же направлением, с которым вышел. Отсюда следует, в частности, что сумма углов треугольника равна  $\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$  (рис. 32).

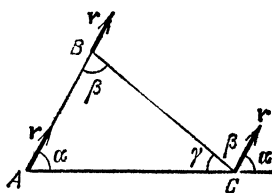


Рис. 32. Сохранение направления вектора  $r$  при параллельном переносе по замкнутому контуру тесно связано с тем, что сумма углов треугольника на плоскости равна  $\pi$ . Вектор  $r$ , перенесенный в вершину  $C$ , вершину  $A$  и вершину  $B$  треугольника  $ABC$ , имеет одно и то же направление, поскольку  $\alpha + \beta + \gamma = \pi$

Читатель может удивиться, с какой стати полстраницы посвящены самым общеизвестным фактам? Но это лишь педагогический прием, который нужен для того, чтобы оттенить далеко не элементарные вещи. Мы повторили свойства *плоского* двумерного многообразия. Но двумерное многообразие может быть и искривленным, не плоским. Представить себе искрив-

ленное двумерное многообразие (кратко  $2D$ ) просто: возьмем искривленную  $2D$ -поверхность в нашем плоском трехмерном пространстве, в котором мы обитаем (о времени  $t$  временно забудем). Простейший пример — поверхность шара (рис. 33) или эллипсоида. Снова можно найти линии, соединяющие кратчайшими путями заданную пару точек на поверхности. При

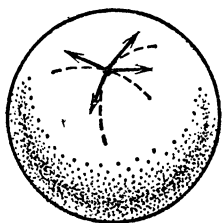


Рис. 33. Пример вектора на кривой поверхности — векторы, касательные к сфере



Рис. 34. При параллельном переносе на искривленной поверхности направление вектора меняется

этом отрываться от поверхности в другие точки трехмерного пространства запрещено — ведь речь идет именно о линиях, целиком лежащих (нарисованных) на поверхности.

Такие кратчайшие линии называются *геодезическими*. Именно по этим линиям муравьи, ползающие по поверхности, прокладывают свои дороги. Геодезические на кривой поверхности играют ту же роль, что прямые на плоскости. Можно определить и понятие двумерного вектора на искривленной (тоже двумерной) поверхности и далее — понятие параллельного переноса вектора из одной точки в другую. Для определения этого действия произведен параллельный перенос в привычном нам плоском трехмерном пространстве (рис. 34). При этом двумерный вектор  $r_0$  отклонится от поверхности ( $r_1$ ), но мы его спроектируем на поверхность ( $r_2$ ), снова сделаем касательным к поверхности. Производя параллельный перенос вдоль заданной линии многими мелкими шагами, получим результат, в пределе не зависящий от числа шагов и совпадающий с тем, что было получено из условия сохранения угла с геодезической. Однако можно поступить иначе и определить параллельный



перенос из условия, что перемещение из одной точки в другую совершается по геодезической и угол между вектором и геодезической остается постоянным. При этом не придется выходить в трехмерное пространство, уходить с рассматриваемой двумерной поверхности.

Эти достаточно простые упражнения в стереометрии (геометрии в трехмерном пространстве) приводят к принципиально новым результатам для геометрии двумерной поверхности.

Возьмем для примера сферическую поверхность. Меридианы являются геодезическими (рис. 35). Два меридиана, вышедшие из одной точки — например, с северного полюса — снова пересекаются на южном полюсе. На плоскости тако- го не бывало!

Все точки шара обладают одинаковыми свойствами. Поэтому из любой точки можно во все стороны выпустить геодезические. Заметим, однако, что на земном шаре через Москву легко провести две геодезические — меридианы на юг и на север. Параллели геодезическими не являются. Единственным исключением является экватор.

Исследуя параллельный перенос вектора '(в каждой точке двумерного, касающегося поверхности Земли)', можно обнаружить, что после обхода замкнутого контура вектор поворачивается!

Это совершенно новое явление, с которым мы не встречались в случае вектора и контура на плоскости. Угол  $\alpha$  поворота вектора пропорционален площади контура. В частности, для сферы

$$\alpha = S/R^2,$$

где  $R$  — радиус сферы,  $S$  — площадь ее поверхности.

Отсюда следует, что изменится и сумма углов треугольника  $\Sigma$ . Поскольку роль прямых на сфере играют геодезические, мы говорим о треугольнике, в котором три точки (три вершины) соединены тремя

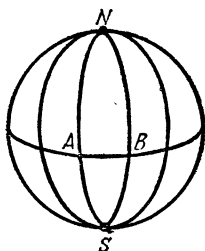


Рис. 35. Сумма углов треугольника на сфере больше, чем  $\pi$ . В треугольнике  $ANB$  сторона  $AB$  — дуга экватора, а стороны  $AN$  и  $BN$  — дуги меридиана, пересекающие экватор под прямым углом, поэтому сумма углов в таком треугольнике превышает  $\pi$  на величину угла  $ANB$

геодезическими линиями

$$\Sigma = \pi + S/R^2,$$

где  $S$  — площадь треугольника.

Проверьте это равенство на треугольнике с одной вершиной на полюсе ( $N$ ) и двумя на экваторе ( $A, B$ ) (рис. 35). Его стороны — два меридиана и отрезок экватора.

Таким образом, геометрия кривой поверхности зависит от величины  $K$ , которую называют *гауссовой кривизной*.

Величина  $R^2$ , т. е. отношение площади к углу поворота вектора, не обязана быть постоянной на всей поверхности — она меняется от точки к точке в случае поверхности сложной формы. В этом случае можно записать

$$\alpha = S \cdot K(x_1, x_2),$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — координаты на поверхности;  $S$  мало, так что и  $\alpha$  мало. Коэффициент  $K$  не обязан быть положительным: там, где поверхность в трехмерном пространстве изогнута как седло,  $K$  отрицателен. Принципиально важно, что эту величину можно определить путем переноса вектора и измерений углов и площадей на двумерной поверхности. Мы не нуждаемся в представлении о плоском трехмерном пространстве, в котором находится двумерная поверхность. Именно этот урок открывает путь к дальнейшим обобщениям.

Можно изучать трехмерное искривленное пространство, хотя мы и не можем представить себе такое пространство наглядно, не можем заказать в мастерской кусок такого пространства.

При переходе от двумерного многообразия к высшим размерностям определение геодезической остается без изменений. Новый момент появляется при определении поворота вектора при параллельном его переносе по замкнутому контуру. Результат переноса зависит от того, как был выбран контур двумерного пространства, но и вектор, и контур всегда лежат на данной поверхности и остается только условиться о том, что знак  $S$ , например, положителен при обходе по часовой стрелке и отрицателен в противоположном случае, а также договориться о знаке угла поворота вектора. Уже в трехмерном пространстве контур можно наклонить по-разному. Результат зависит и от начального наклона переносимого вектора; результат

поворота выражается как малый вектор, перпендикулярный исходному (это условие следует из того, что длина вектора при переносе не меняется). Однако условие перпендикулярности малого вектора исходному единичному еще не определяет полностью этот малый вектор. Поэтому кривизна трехмерного пространства выражается не одной функцией точки  $K(x_1, x_2)$ , а несколькими.

После создания теории относительности пространство и время объединились в один комплекс. Этот комплекс плоский, но его геометрия сложнее четырехмерного евклидова пространства с координатами  $x, y, z, w$ . Роль длины в четырехмерном евклидовом пространстве играет величина

$$l^2 = x^2 + y^2 + z^2 + w^2.$$

Но в теории относительности «интервал» — инвариантная величина типа длины — дается выражением

$$S = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2,$$

где  $c$  — скорость света. Такое 4-мерное пространство называется *плоским псевдоевклидовым* \*).

Общая теория относительности «в ореховой скорлупе» состоит в том, что рассматривается *искривленное псевдоевклидово* пространство.

### Физика искривленного псевдоевклидова пространства

Эйнштейн выдвинул предположение, что в искривленном пространстве-времени любые частицы движутся по геодезическим этого пространства-времени.

Если пространство плоское, его геодезические — это прямые линии, а прямые в псевдоевклидовом пространстве соответствуют движению с постоянной скоростью по трехмерной прямой траектории, т. е. инерциальному движению.

Предположение о геодезических сразу отвечает на вопрос о том, почему различные тела движутся по одним и тем же траекториям. Раньше мы сказали бы

---

\*) «Псевдо» в переводе с латыни означает «якобы», т. е. «тот, да не тот», пространство хоть и похоже на евклидово, «но» существенно отличается от евклидова знаком одного слагаемого ( $-c^2 t^2$  вместо  $w^2$ ).

«по траекториям в поле тяготения», теперь мы говорим «по геодезическим» и ясно, что геодезические характеризуют пространство-время и не зависят от сорта частиц.

Второе предположение Эйнштейна состоит в том, говоря наглядно, что пространство-время обладает определенной упругостью, а вложенные в пространство тела и поля стремятся искривить его. При полном отсутствии вещества в настоящее время и в прошлом имеет место плоское (псевдоевклидово) пространство-время специальной теории относительности. С плотностью материи связана определенная комбинация величин, характеризующих кривизну пространства-времени.

Еще из СТО нам известно, что если в одной системе отсчета задана определенная плотность покоящегося вещества, то в другой движущейся системе отсчета появляется трехмерный вектор потока массы (или потока энергии) и натяжения (величины, подобной давлению или силе сдвига).

Неудивительно поэтому, что в уравнение для кривизны равноправно входят все эти величины. Поэтому в целом получаются 10 уравнений, связывающих кривизну со свойствами вещества (1 плотность энергии, 3 компоненты вектора потока энергии и 6 компонент силы в веществе).

Существенное замечание состоит в том, что в четырехмерном пространстве-времени общее число величин, характеризующих кривизну, больше 10. Поэтому пространство-время оказывается искривленным и вне тяжелых тел, и в их окрестности: таково, например, пространство, окружающее Солнце. Кривизна этого пространства влияет на движение планет и имитирует то, что раньше называлось гравитационным полем Солнца. Общая теория относительности объясняет сам закон тяготения, объясняет убывание эффективной силы по закону  $1/r^2$ . Более того, ОТО объяснила и малые отклонения от закона тяготения Ньютона, которые были уже давно обнаружены в движении ближайшей к Солнцу планеты — Меркурия.

Была развита также теория распространения электромагнитных волн в искривленном пространстве-времени. Предсказания этой теории: отклонение лучей света, проходящих вблизи диска Солнца, и изменение частоты света при распространении в поле

тяготения — эти предсказания великолепно, со всей точностью современной техники подтверждены опытом.

Еще одно предсказание ОТО состоит в том, что в пустом пространстве могут распространяться волны кривизны — так называемые *гравитационные волны*. Эти волны во многом подобны электромагнитным: они имеют такую же скорость распространения  $c$ , несут энергию и импульс. Гравитационные волны вызывают движение тел, лежащих на их пути, но реально ожидаемый эффект столь мал, что до сих пор он не наблюден.

Источником гравитационных волн является, например, двойная звезда. При этом двойная звезда сама теряет энергию, расстояние между двумя звездами уменьшается, так же как электрон приближается к ядру при испускании электромагнитных волн \*). При этом меняется — уменьшается — период обращения двойной звезды.

Этот эффект был наблюден несколько лет тому назад. Таким образом, ситуация с гравитационными волнами в настоящее время такая же, как с нейтрино в 1932—1952 гг.: мы наблюдаем эффекты, зависящие от испускания гравитационных волн, но не умеем обнаруживать сами волны.

И все-таки подчеркнем, что точнейшие измерения количественно подтвердили предсказание ОТО о существовании и испускании гравитационных волн.

### **Тяготение и другие силы**

Создание ОТО является замечательным творением человеческого разума. Недаром Эйнштейн говорил, что другие его работы — специальная теория относительности, теория броуновского движения как часть термодинамики, теория фотонов (сегодня можно добавить индуцированное излучение и статистику Бозе — Эйнштейна) шли в русле исследований науки своего времени. То, что он сделал, было бы сделано без него другими, может быть, на два-три года позже.

Однако он делал исключение для ОТО: открытие ОТО могло бы задержаться на 50 лет!

---

\*) Понятно, что в случае двойной звезды (в отличие от атома) квантовые эффекты не играют роли.

Показательно, как мало экспериментальных предпосылок понадобилось Эйнштейну: только равенство ускорений всех тел и, как вывод отсюда, принцип эквивалентности тяготения и ускорений системы координат (включающий невесомость в падающем лифте).

Добавив к этому общую геометрическую идею Лобачевского — Римана о возможности искривления пространства, Эйнштейн построил полную теорию тяготения!

При этом теория тяготения оказалась внешне совершенно не похожей на электродинамику Максвелла. Пафос Максвелла — поля, пафос Эйнштейна — отказ от какого-либо поля!

Но невозможно отрицать глубокое сходство явлений, вплоть до распространения электромагнитных и гравитационных волн с одинаковой скоростью.

Как же увидеть внутреннюю связь, причины сходства двух рядов явлений? После создания и подтверждения ОТО Эйнштейн все свои силы на протяжении 40 лет изнуряющей работы прилагал к созданию «единой теории» и в первую очередь — к созданию геометрической теории электромагнетизма.

Все развитие физики за эти годы казалось противоречащим идее объединения всех физических законов и превращения физики в геометрию. Именно период с 1915 г. по настоящее время отличается тем, что физики открывали все новые и новые частицы — нейтрон, позитрон, нейтрино, странные частицы, мезоны и  $W^\pm$ , и Z-частицы, кварки, глюоны — не будем повторять все сказанное в предыдущих главах.

Картина мира становилась все более пестрой и многокрасочной. Соответственно, казалось все менее вероятным сведение всего разнообразия частиц, полей и взаимодействий к единому геометрическому образу.

Еще один количественный довод, казалось, давал веский аргумент *против* объединения теории тяготения и всей остальной физики.

Этот довод восходит к 1900 г. Когда Планк открыл существование величины, называемой ныне постоянной Планка, в законе излучения, он сразу определил ее размерность. В современных обозначениях  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-27} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}$ .

Но уже давно до этого были известны две другие фундаментальные постоянные, определяющие законы

природы: скорость света  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/с и гравитационная постоянная, входящая в закон тяготения,  $G = 6,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{с}^2}$ .

Присоединяя к этим двум ( $c$  и  $G$ ) величину  $\hbar$ , получаем три величины, выраженные через три единицы измерения — грамм, сантиметр и секунда.

Но это значит, что можно найти теперь фундаментальную массу, длину и время:  $m_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar \cdot c/G}$ ,  $l_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar \cdot G/c^3}$ ,  $t_{\text{Pl}} = \sqrt{G \cdot \hbar/c^5}$ . Эти величины называют «планковскими». Их обозначения и числовые значения (см. Введение):

$$m_{\text{Pl}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ г}, \quad l_{\text{Pl}} = 1,5 \cdot 10^{-33} \text{ см}, \\ t_{\text{Pl}} = 5 \cdot 10^{-44} \text{ с}.$$

Планковская масса оказывается огромной величиной в  $10^{19}$  раз больше массы протона, в  $10^{22}$  раз больше массы электрона!

Казалось бы, это свидетельствует о том, что тяготение не имеет ничего общего с теорией элементарных частиц. Но взаимоотношения между тяготением и частицами можно придать другую форму. Сила кулоновского электростатического притяжения электрона к протону равна  $F_e = e^2/r^2$ . Сила ньютоновского притяжения этих же двух частиц равна  $F_g = Gm_e m_p/r^2$ , где  $m_e$  — масса электрона,  $m_p$  — масса протона (не путать с  $m_{\text{Pl}}$  — планковской массой!). Зависимость от расстояния одинаковая. Значит, безразмерное отношение этих сил не зависит от расстояния.

Найдем это отношение:

$$\beta = \frac{F_g}{F_e} = \frac{Gm_e m_p}{e^2} = \frac{6,7 \cdot 10^{-8} \cdot 9 \cdot 10^{-28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-24}}{(4,8 \cdot 10^{-10})^2} \approx 4 \cdot 10^{-40}.$$

Отношение ничтожно мало, никакие спектроскопические измерения энергии атома водорода (да и любого другого атома или молекулы) не дадут возможности обнаружить гравитационные поправки к энергии.

Но наряду с этим практическим выводом малость  $\beta$  наводит на мысль, что гравитация не имеет отношения ни к электромагнитному, ни к другим видам (слабому, сильному) взаимодействия частиц.

Два аргумента, приведенные выше ( $m_{\text{Pl}} \gg m_p$ ,  $m_e$  и  $\beta \ll 1$ ) не независимы, они связаны между собой

простым арифметическим соотношением

$$\beta = \frac{Gm_em_p}{e^2} = \frac{\hbar c}{e^2} \cdot \frac{m_e}{m_{Pl}} \cdot \frac{m_p}{m_{Pl}} = 137 \frac{m_e}{m_{Pl}} \cdot \frac{m_p}{m_{Pl}}.$$

Малость  $\beta$  есть результат того, что в планковских единицах измерения масса электрона, как и масса протона, ничтожна:

$$m_e/m_{Pl} = 10^{-22}, \quad m_p/m_{Pl} = 10^{-19}.$$

Внимательный читатель уже обратил внимание на то, что весь параграф написан в сослагательном наклонении: «Казалось бы», что гравитация никак не связана с элементарными частицами. В действительности современная физика преодолевает эту пропасть. Сказанное выше надо рассматривать как указания на характер тех трудностей, которые при этом приходится преодолевать.

### Тяготение как поле в плоском пространстве

Еще Эйнштейн в ходе конкретных расчетов рассматривал ситуацию, когда гравитационные эффекты, а следовательно, и кривизна пространства-времени, *малы*. В этом случае можно считать малым и отличие пространства-времени от плоского пространства-времени специальной теории относительности.

Эти малые отклонения можно характеризовать 10 величинами, функциями координат, которые играют роль потенциалов. Кривизна выражается через частные производные (см. Математическое дополнение, с. 201) этих 10 величин по времени и по пространственным координатам. Не случайно число потенциалов (10) совпадает с числом компонент тензора плотности энергии, импульса и напряжений вещества.

Ряд ученых развивали это направление. Оказалось, что можно построить теорию тяготения, очень похожую на теорию Максвелла. Отличие состоит в том, что

1) кванты свободно распространяющегося поля, *гравитоны*, имеют спин 2, в отличие от квантов электромагнитного поля, фотонов, спин которых равен 1,



Масса гравитонов в точности равна нулю, так же как и масса фотонов — еще один элемент сходства;

2) теория гравитационного поля *нелинейна*. Источниками гравитационного поля является энергия вещества. Но гравитационное поле и само имеет определенную плотность энергии. Значит, в правой части уравнений для потенциалов тяготения, наряду с энергией вещества, находится и энергия гравитационного поля, квадратично зависящая от самих потенциалов тяготения.

Сегодня это не удивительно. Теория тяготения не похожа в этом отношении на теорию Максвелла, но она похожа на теорию глюонов. Впрочем, эта формулировка звучит как «дедушка вырос очень похожим на внука». Правильнее было бы сказать, что теория тяготения оказалась прообразом и первым примером современных нелинейных теорий поля.

Правильно сформулированная «полевая» теория тяготения согласуется по всем наблюдаемым выводам как с опытом, так и с общей теорией относительности.

Важнейший принципиальный вопрос состоит в следующем: отменяется ли в свете сказанного идея кривизны пространства-времени? Не оказывается ли общая теория относительности только промежуточным этапом, строительными лесами, которые можно убрать после построения полевой теории?

На четко поставленный вопрос можно дать и четкий — отрицательный — ответ.

В действительности именно полевая теория, воспринятая буквально, приводит к принципиальным трудностям. Полевая теория строится в плоском пространстве и времени. Но как определяется пространство и время? Для этого нужны эталон длины, эталон времени, нужны световые лучи, связывающие различные точки пространства.

Гравитационные поля (которые мы теперь описываем потенциалами) взаимодействуют со всеми формами вещества, в частности, и со светом — электромагнитным полем. Поэтому размеры эталона длины — атома водорода — оказываются различными в разных местах. Точно так же различны и частоты данного атомного перехода в зависимости от потенциала. Скорость света зависит и от места, и от направления распространения! Но все это означает, что *фиктивно* плоское пространство, в котором развивается полевая

теория тяготения\*)]. Общая теория относительности и основная ее идея кривизны пространства-времени остаются непоколебленными. Таков итог многолетних, не законченных и сегодня дискуссий. Поскольку они не закончены, точнее надо сказать, что таким представляется этот итог авторам (и не им одним).

Вместе с тем, нельзя отрицать и пользу альтернативной полевой теории тяготения.

Выше уже было сказано о практическом удобстве вычислений. Можно добавить, что квантование теории и, в частности, вывод о существовании гравитонов и о том, что их спин равен 2, получены именно в такой формулировке теории тяготения.

Но еще важнее, что полевая формулировка открывает путь к дальнейшим обобщениям. Была развита теория, в которой определенным симметричным образом, наряду с гравитонами (спин 2), вводятся не наблюдаемые до сих пор частицы — *гравитино* — со спином  $3/2$ . Так как эти частицы — фермионы, то они не дают классического поля, не меняют закон тяготения. Однако для высших приближений квантовой теории тяготения гравитино необходимы.

Полевая теория тяготения может быть включена в объединение с большим числом полей и частиц — в том числе, с электромагнитным полем, с электронами и позитронами, глюонами, кварками и др.

Симметрии, объединяющие бозоны и фермионы, математически сложны и очень своеобразны. Мы не будем и пытаться объяснить эти теории по существу. Приведем только названия: *суперсимметрия* и *супергравитация*.

Невольно вспоминается неудобопечатаемая история о том, как «товарищ морского министра», академик Крылов объяснял в 1912 г. великому князю разницу между дредноутом и супердредноутом... — Умолкаю! «Sapienti sat», что по-латыни означает: «Кто знает, тот пусть и знает».

---

\*) Будем производить геометрические и временные измерения, пользуясь стандартным эталоном длины — платиновым метром, эталоном времени — частотой атомных колебаний, эталоном скорости — скоростью света в пустоте (достаточно выбрать два эталона из указанных трех). Такие измерения неизбежно приводят к выводу, что пространство-время не плоское,

Психологический барьер перехода к объединению полей с очень сильно отличающейся массой в теории уже перейден в моделях Великого объединения (см. выше). В этих моделях появляются частицы с массой, превышающей  $10^{15}$  ГэВ. Отсюда уже не далеко и до объединения с планковскими масштабами.

Отметим наконец, что гигантское различие между планковской массой, с одной стороны, и массой протона или электрона, с другой стороны, в настоящее время уже не воспринимается как непреодолимая пропасть при наведении мостов между тяготением и остальной физикой.

С одной стороны, по мере увеличения энергии ускорителей, растет и масса наблюдаемых частиц. Уже упоминалось открытие W и Z с массой почти в 100 раз большей массы протона. Для W и Z отношение  $m/m_p = 10^{-17}$ , показатель уменьшился на 12 % по сравнению с протоном. Вполне вероятно, что с вводом в строй ускорителя с энергией встречных частиц  $2 \times 20\,000$  ГэВ будут открыты и еще более тяжелые частицы. Заполнить интервал до планковской массы помешают, возможно, только принципиальные технические трудности. (При темпе ускорения 1 МэВ/см, которого только надеются достичь, для энергии  $10^{19}$  ГэВ требуется длина ускорителя порядка размера Галактики.) Но есть и другое, теоретическое замечание: отношение масс  $10^{19}$  кажется неестественным и означающим отсутствие связи тяготения и частиц лишь до тех пор, пока мы думаем в привычных терминах

теории возмущений:  $m_1 = \frac{e^2}{\hbar \cdot c} m_2 = \frac{1}{137} m_2$  или  $m_1 = \left(\frac{1}{137}\right)^2 \cdot m_3$ . Такие соотношения неплохо выполня-

ются для мюона и тау-частицы при сравнении их с электроном. Но современные теории оперируют и величинами типа \*)  $\exp(\hbar c/e^2) = 10^{50}$ .

Конечно, от такой игры числами очень далеко до логически связной теории. Однако и «большие числа»  $10^{19}$  или  $10^{22}$ , или даже  $Gm_1m_2/e^2 = 10^{-40}$  не пугают современного теоретика.

---

\*) В частности, в моделях Великого объединения масса барлептонных полей  $\sim 10^{15}$  ГэВ получена из выражений такого рода.

## Мечты теоретиков конца восьмидесятых годов

Только что мы говорили о возможности записи тяготения как поля и объединения на этой основе тяготения с другими полями.

Но есть и другой путь объединения — путь дальнейшего использования идеи Эйнштейна. Здесь невозможно сколько-нибудь внятно и понятно описать те направления, которые обсуждаются в настоящее время.

В самой общей форме можно сказать, что строится квантовая геометрическая теория. Однако теперь речь идет о геометрии 10- или 11-, или 26-мерного пространства. При этом предполагается, что развитие теории приведет к одному измерению, играющему роль времени, и 3 измерениям, играющим роль пространственных координат. Так будет отдана дань физике *теории относительности*, обычной, тривиальной, общеизвестной физике. Лишние 6 или 7, или 22 измерения образуют какое-то подобие сверхмалого замкнутого тела. Его масштаб порядка планковской длины. Движение по этим измерениям не наблюдается как пространственное движение. Кривизна (или изменение кривизны) лишних измерений воспринимается нами в обычных 4-х измерениях как поля электромагнитное, глюонное и т. д. Геометрия должна быть еще более усложнена для того, чтобы сделать возможным геометрическое описание фермионов. Наряду с чисто геометрической теорией рассматриваются такие теории, в которых в многомерном пространстве находятся линии — *струны* и *суперструны*, движение которых образует двумерные поверхности.

Ни сами эти теории, ни способы популярного их изложения еще не установились. Поэтому оставим дальнейшие попытки каких-то разъяснений по существу и ограничимся двумя вопросами:

- 1) какие цели ставит перед собой новая теория и
- 2) как в свете новой теории будет выглядеть уже существующая, экспериментально подтвержденная физика (электродинамика, хромодинамика...).

По первому вопросу — о целях — можно наметить два этапа.

Первый этап состоит в построении теории, которая была бы конечной. Другими словами, ценой фанта-

стической логики необычных геометрических представлений нужно получить логически замкнутую теорию, не имеющую, по крайней мере, противоречий. Бесконечности, даже если они получаются только в высоком приближении, означают, что теория неправоильна и во всяком случае не окончательна. Этого и стремится избежать новая теория.

Следующая, вторая задача новой теории состоит в том, что она должна стать всеобъемлющей, притом не только на качественном, но и на количественном уровне. Это значит, что теория должна:

1) получить из первых принципов весь набор частиц и полей. Фактически оказывается, что все варианты новой теории предсказывают большее число сортов частиц и полей, чем мы наблюдаем. К этому вопросу мы еще обратимся ниже;

2) получить — также из первых принципов — массы частиц или, точнее, безразмерные отношения масс частиц к планковской массе и безразмерные константы, характеризующие взаимодействия, такие как  $e^2/\hbar c = 1/137$ .

Характерно, что уже появляются доклады, озаглавленные «Вычисление постоянной тонкой структуры», т. е.  $1/137$ . В целом, программа новой теории рассчитана не менее, чем до 2000 года.

Что же представляет собой современная экспериментальная физика с энергиями не выше 1000 ГэВ с точки зрения новой теории, в которой единица энергии — планковская — равна  $10^{19}$  ГэВ?

Сейчас в ходу термин «низкоэнергетический предел (или низкоэнергетическая асимптотика) будущей единой теории». Этот термин подразумевает прежде всего, что законы и саму картину мира современной физики не следует экстраполировать слишком далеко, в область планковских энергий. «Всяк сверчок, знай свой шесток», не будем требовать от низкоэнергетической теории всеобщей применимости, за отведенными ей пределами.

Однако — и это не всегда осознается — переход от полной теории к приближенной (в данном случае — низкоэнергетической) есть не только потеря, но и приобретение.

Приближенная теория теряет точность, область ее применимости сужается, но зато в приближенной

теории появляются качественно иные понятия, по сравнению с всеобъемлющей точной теорией.

Эту глубокую мысль высказал В. А. Фок в замечательной статье «О значении приближенных методов в теоретической физике». Вот один из примеров, приведенных Фоком: в механике Ньютона есть понятие одновременности. В теории относительности оно исчезает. Значит, переход от теории относительности к рассмотрению движения с малыми скоростями ( $v/c \ll 1$ ) и к механике Ньютона сопровождается *возрождением* понятия одновременности!

Точно так же низкоэнергетическая теория вводит важнейшие наглядные понятия: поле, частица, античастица и т. д. В полной теории этого нет — есть только очень абстрактные, очень трудные формулировки, из которых в принципе — но с большим трудом — можно все получить. Но нужно ли всегда так действовать?

Наш вывод: электродинамика и квантовая хромодинамика останутся навсегда — как осталась в машиностроении механика Ньютона.

Если бы не это глубокое убеждение, мы не стали бы писать книгу, лежащую перед Вами.

### Частицы и Вселенная

Теоретическая физика связывает между собой свойства микромира, проявляющиеся на самых малых расстояниях, и свойства Вселенной — самого большого объекта исследования.

В микромире мы имеем дело с расстояниями от  $10^{-33}$  см (планковская длина) до  $10^{-13}$  см (размер ядра, размер протона) и  $10^{-8}$  см (размер атома).

Во Вселенной наиболее далекие объекты находятся от нас на расстоянии порядка  $20 \cdot 10^9$  световых лет, что равно  $6 \cdot 10^9$  мегапарсеков и равно  $2 \cdot 10^{28}$  см. Размеры отдельных галактик порядка  $10^{23}$  см, астрономическая единица (а. е.) — так называется расстояние от Солнца до Земли — равна  $1,5 \cdot 10^{13}$  см, диаметр Солнца  $1,5 \cdot 10^{11}$  см.

Итак — совершенно несравнимые масштабы, тем не менее есть тесная связь между теорией частиц и космологией. И в последние годы, когда теория элементарных частиц вышла в своих предсказаниях да-

леко за пределы возможностей лабораторного опыта, эта связь приобретает особое значение.

Напомним некоторые основные положения современной космологии. Вселенная расширяется. Это означает, что в прошлом ее средняя плотность была больше. Вселенная наполнена однородным и изотропным электромагнитным излучением с температурой 3 К. Это очень низкая температура. Но в расширяющейся Вселенной такое излучение — остывший след горячих и плотных стадий расширения. И незыблем вывод современной космологии о том, что в прошлом Вселенной существовал период, когда вещество представляло собой горячую плазму, находившуюся в тепловом равновесии с излучением. Этот вывод составляет «жесткую сердцевину», проверенную в астрофизических наблюдениях.

Обращаясь вспять по времени, космология заглядывает в такие периоды эволюции Вселенной, когда при высокой плотности энергии вещества и излучения оказывались возможными любые маловероятные процессы превращения элементарных частиц, открывались каналы рождения самых тяжелых частиц. Процессы, недоступные исследованию в лабораторных установках, но уверенно предсказываемые для частиц сверхвысоких энергий, обретают реальность в далеком прошлом Вселенной, стоящем перед мысленным взором современной космологии. Космология может проводить мысленные эксперименты, анализировать, к каким следствиям для современной Вселенной приведет осуществление в ее далеком прошлом того или иного физического процесса, предсказываемого теорией и недоступного лабораторному опыту. Это превращает Вселенную в уникальную лабораторию элементарных частиц.

Ниже мы отнюдь не ставим своей целью подробно и последовательно рассказать о современной космологии. Такой теме посвящают отдельные монографии, больше всей нашей книги по объему. Мы выделим четыре вопроса. Все они в той или иной мере связаны с физикой, недоступной лабораторным исследованиям.

Их короткие названия:

- 1) скрытая масса;
- 2) асимметрия вещества и антивещества;

3) скалярное поле и инфляция;

4) космологическая постоянная.

Содержание этих вопросов будет расшифровано в ходе их обсуждения.

Первый и самый простой вопрос (не имеющий тем не менее простого ответа): чем заполнена Вселенная?

Мы знаем, что в каждом кубическом сантиметре Вселенной в среднем находятся 500 фотонов. Проследив эволюцию Вселенной от далекого прошлого, мы убеждаемся в том, что имеется примерно равное число (суммарное) нейтрино и антинейтрино всех сортов.

Средняя концентрация обычного вещества — протонов (свободных и в виде атомов водорода, и входящих в другие ядра) и нейтронов (в составе ядер) — около  $10^{-7}$  см $^{-3}$ , т. е. одна штука в 10 м $^3$ .

Средняя плотность вещества при этом составляет около  $10^{-30} \div 10^{-31}$  г/см $^3$ . Между тем, есть много аргументов, основанных на динамике галактик, скоплений галактик и других, которые указывают на гораздо более высокую общую плотность вещества.

Каков возможный выход из этого противоречия?

Один вариант состоит в предположении, что масса нейтрино в действительности не точно равна нулю.

Число нейтрино в единице объема так велико, что достаточно предположить  $m_\nu = \frac{1}{20\,000} m_e$  \*) (в энергетических единицах — 25 электронвольт), чтобы получить новую общую плотность.

При бета-распаде образуются нейтрино с энергией в сотни тысяч и миллионы электронвольт. Поэтому малая собственная масса («масса покоя») не изменит спектр бета-распада. Только при распаде трития можно в принципе наблюдать малое изменение спектра (рис. 36). Группа московских физиков утверждает, что такое изменение спектра наблюдается. Для окончательного суждения нужно подождать подтверждения другими экспериментальными группами.

Однако в настоящее время кажется весьма вероятным, что набор элементарных частиц отнюдь не ограничивается теми частицами, существование которых доказано на опыте. Возможно, что есть совсем иной класс частиц, практически не взаимодействуя-

---

\*)  $m_e$  — масса электрона, равная  $9 \cdot 10^{-28}$  г.



щих с известными нам частицами. Точнее, эти новые частицы не взаимодействуют ни электромагнитно, ни сильно, ни слабо. Однако они имеют определенную энергию и поэтому взаимодействуют с нашим миром гравитационно. Мы уже говорили о слабости гравитационного взаимодействия на уровне элементарных частиц. Поэтому открыть и исследовать эти частицы в лаборатории будет необычайно трудно.

Тем не менее, не исключено — а, скорее, даже вероятно — что именно эти неизвестные нам частицы составляют 80 или 90 % общей массы в каждом достаточно большом объеме, произвольно выбранном во Вселенной. При образовании галактик и звезд большая плотность достигается благодаря тому, что нагретый газ отдает энергию излучением. Неизвестные частицы или вовсе не излучают, или излучают другие, неизвестные нам подобия фотонов. Поэтому в составе звезд нельзя ожидать сколько-нибудь заметного количества неизвестных частиц — они пролетают сквозь звезду без столкновений и без торможения.

Обратимся теперь ко второму вопросу.

### Барионная асимметрия

Естественно предположить, что в начале расширения линейные размеры Вселенной  $a_0$  были порядка планковских ( $10^{-33}$  см), и плотность вещества была порядка планковской ( $10^{93}$  г/см<sup>3</sup>). Тогда и масса всего вещества была порядка планковской,  $10^{-5}$  г. Если даже это вещество состояло целиком из покоящихся нуклонов, общее число их было ничтожно, порядка  $10^{19}$  штук. Еще меньшее число получится, если учесть принцип Паули и движение нуклонов.

В настоящее время нет никаких оснований думать, что где-то существуют антигалактики. Они проявля-

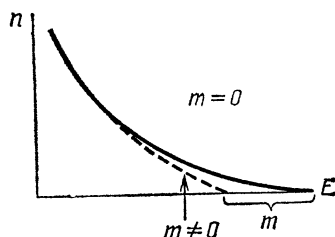


Рис. 36. Случаи нулевой (сплошная линия) и ненулевой (штриховая линия) массы нейтрино отличаются формой бета-спектра вблизи его верхней границы и величиной максимальной энергии электронов, т. е. величиной верхней границы бета-спектра

лись бы в аннигиляционном излучении на стыках между галактиками и антигалактиками, а также в сплошных пустых областях, отделяющих области, заполненные веществом от областей с антивеществом. Ничего подобного не наблюдается!

При высокой температуре  $kT \gg m_p c^2$  ( $m_p$  — масса протона), несомненно, было много барионов и антибарионов. Однако несмотря на усилия многих теоретиков, не удалось найти механизм, который разделял бы барионы и антибарионы в астрономических масштабах.

Таким образом, и наблюдения, и расчеты, относящиеся к той стадии, на которой физика нам хорошо понятна, приводят к такой картине: на стадии  $kT \gg m_p c^2$  Вселенная заполнена равновесной плазмой с большим количеством барионов и антибарионов — но все же везде есть небольшой (порядка  $10^{-9}$ ) избыток числа барионов над числом антибарионов \*).

В ходе охлаждения остается *только* этот избыток, все остальные барионы аннигилируют с антибарионами. Именно так получается современный средний состав Вселенной, где в среднем на один барион приходится  $10^9$ – $10^{10}$  фотонов. В этом смысле барионов мало (отношение концентрации барионов и фотонов, обозначаемое  $B/\gamma$ , составляет  $B/\gamma \sim 10^{-9} \div 10^{-10}$ ).

Подсчитаем теперь общее количество барионов в наблюдаемой области Вселенной (шар радиусом порядка  $c/H = 6000$  мегапарсеков  $= 2 \cdot 10^{28}$  см, где  $H = 50$  км/(с·Мпк)). Объем равен  $3 \cdot 10^{85}$  см<sup>3</sup>, плотность около  $3 \cdot 10^{-7}$ , итого общее количество барионов около  $10^{78}$ . Это огромная величина, по сравнению с максимальным начальным количеством порядка  $10^{19}$ .

Итак, астрономические соображения приводят к неизбежному выводу, что Вселенная переживала период, когда барионный заряд не сохранялся!

Речь идет не о тривиальном процессе рождения и аннигиляции барион-антибарионных пар. Такой процесс уже 30 лет наблюдается в лаборатории. Этот процесс сохраняет барионный заряд. Но астрономия доказывает, что могли — должны были! — рождаться отдельные барионы (без антибарионов). По общим принципам квантовой теории это означает также, что

---

\*) Этот избыток образуется уже после инфляционной стадии (см. ниже).

возможен самопроизвольный, спонтанный, распад протона, например, на позитрон и нейтральный пион, или мюон и пион. Нестабилен также и нейтрон. Более того, возможен распад не только свободных, но и связанных нейтронов и протонов.

С этой точки зрения *любая* форма обычной материи должна быть радиоактивной.

В начале восьмидесятых годов среди физиков-экспериментаторов возник ажиотаж, неистовое соревнование — кто первый откроет самопроизвольный, радиоактивный распад протонов. Опыты ставили главным образом с большими резервуарами воды. Воду легче очистить от примеси обычных радиоактивных веществ. Продукты распада дают в воде черенковское излучение, и благодаря прозрачности воды это излучение (его часть, приходящуюся на видимый свет) можно улавливать в толстом слое воды. Рекордный опыт состоял в наблюдении 10 000 тонн воды в течение двух лет, в шахте, под толстым слоем горной породы, уменьшающей фон космических лучей. Не было зарегистрировано ни одного распада! Это значит, что время жизни протона больше, чем  $10^{32}$  лет. Такой результат создает определенные трудности для простейшего варианта теории.

И все же теоретики убеждены в том, что в очень экзотических условиях ранней Вселенной тем или иным способом рождение барионов происходило. Здесь особенно важно подчеркнуть, что нет векторного поля, которое было бы связано с барионами так, как электромагнитное поле связано с электрическим зарядом.

Выше отмечалось, что сама структура уравнений Максвелла исключает, запрещает несохранение электрического заряда. Вот такого абсолютного запрета несохранения барионного заряда нет, поскольку нет соответствующего поля. Современная физика придерживается точки зрения: «Все, что не запрещено, происходит». Раньше господствующая точка зрения была: «Все, что не доказано опытом, не существует».

Сегодняшняя точка зрения вместе с доводами астрономии доказывает несохранение барионов. При сверхвысоких температурах характерное время процесса распада бариона может быть ничтожным — порядка  $10^{-28}$  с, например. О времени спонтанного распада мы ничего не можем сказать, кроме того, что оно

велико. Может быть, это время —  $10^{33}$  лет, и после еще одного усилия в ближайшие годы распад будет обнаружен. Если это время — порядка  $10^{40}$  лет или больше, обнаружение его практически невозможно, при учете необходимого количества воды и времени и фона от космических лучей.

Заметим, что для объяснения избытка вещества над антивеществом во Вселенной необходимо, но не достаточно, чтобы протоны были неустойчивы. Нужно еще, чтобы была асимметрия законов рождения и распада для вещества и антивещества. Такая асимметрия природы действительно обнаружена — но на других объектах.

Асимметрия проявляется только тогда, когда введена «стрела времени», т. е. когда система эволюционирует.

В термодинамическом равновесии в покоящейся системе вещество и антивещество даже при сверхвысокой температуре должны содержаться в равном количестве.

Однако Вселенная расширяется, и поэтому в ней будущее отличается от прошлого, несимметрия рождения вещества и антивещества может проявиться!

Последнее замечание: почему в избытке оказывается именно *вещество*, а не антивещество? Серьезного ответа на этот вопрос нет, как нет и конкретной теории процесса.

Можно перевести вопрос в филологическую плоскость. Мы *называем* веществом именно те частицы, которые рождаются в избытке. Вспомним двестишестидесятые годы: «Мятеж никогда не кончался удачей, иначе бы он назывался иначе».

Однако это не вся правда. Определим «вещество» как то, из чего построены Солнце, планеты и все остальное. При этом мы определим и положительный знак электрического заряда как знак заряда протона. Тогда возникает вопрос, почему в распаде  $K^0$ -мезона получаются преимущественно именно *положительные* пионы, электроны (позитроны) и мюоны вместе\*). На этот вопрос ответа еще нет, что и не удивительно,

---

\*) Этот распад есть один из тех процессов, в которых на опыте установлена несимметрия частиц и античастиц.

так как не установлен механизм возникновения барионного заряда, известно лишь, что такой процесс не противоречит законам физики.

### Инфляционная Вселенная

Современная теория расширяющейся Вселенной содержит как неотъемлемую часть представление о периоде экспоненциального расширения. В этот период все масштабы (в том числе и радиус Вселенной, если она замкнута) растут как  $\exp(Ht)$  — по тому закону (рис. 37), по которому растут цены, когда экономика страны поражена инфляцией. Только здесь  $H$  — постоянная Хаббла в период инфляции. При этом время такого роста может быть очень малым, например,  $10^{-33}$  секунды. Но если постоянная Хаббла в этом периоде равна  $10^{36} \text{ с}^{-1}$ , то произведение  $Ht$  равно 1000. Это значит, что радиус успевает вырасти в  $\exp(1000) = 10^{434}$  раза. При начальном планковском радиусе  $10^{-33}$  см получим радиус  $10^{400}$  см, в гигантское число раз превышающий современную наблюдаемую Вселенную. В настоящее время под влиянием идеи инфляционного расширения считается весьма вероятным, что наблюдаемая часть Вселенной (радиус которой порядка  $c/H = 6000$  мегапарсек = 20 000 миллиардов световых лет) составляет ничтожную долю всей Вселенной, даже если Вселенная замкнута и, следовательно, имеет конечный полный объем.

Но каковы условия, необходимые для экспоненциального роста радиуса?

Оказывается, что такой режим расширения возникает при наличии *скалярного поля*. При этом необходимо, чтобы плотность энергии скалярного поля содержала наряду с обязательными градиентными членами  $\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)^2, \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2$  еще и «потенциал»  $V(\phi)$ .

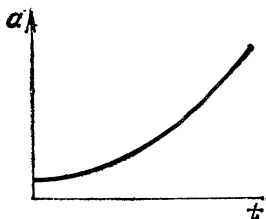


Рис. 37. Вызываемая скалярным полем инфляция — экспоненциальный рост радиуса Вселенной со временем — обеспечивает раздувание Вселенной до размеров, охватывающих наблюдаемую в настоящее время часть Вселенной

При расширении главную роль начинает играть потенциал  $V(\varphi)$ \*). Но если  $\varphi$  есть скаляр, то числовое значение  $\varphi$  одинаково в любой системе координат, не изменяется при преобразовании Лоренца.

Плотность энергии  $V(\varphi)$  есть  $T_0^0$ -компонента тензора энергии-импульса-натяжений. Если  $\varphi$  инвариантно относительно лоренц-преобразования, то инвариантен и весь зависящий от  $\varphi$  тензор. Именно с целью добиться такой инвариантности нужно было пренебречь производными  $\partial\varphi/\partial t$ ,  $\partial\varphi/\partial x$  — они образуют 4-вектор, *неинвариантный*.

Вернемся к ситуации, когда доминирует  $V(\varphi)$ . Условие инвариантности тензора приводит к выводу\*\*): плотность энергии  $\varepsilon = V(\varphi)$ , давление  $p = -\varepsilon = -V(\varphi)$ , все другие величины — потоки энергии и космонапряжения — равны нулю.

Именно отрицательное давление и есть главная причина, побуждающая рассматривать скалярное поле. В земной физике встречается отрицательное давление — до  $-2 \cdot 10^8$  г/(см·с<sup>2</sup>) в потоках воды, до  $-2 \cdot 10^{10}$  г/(см·с<sup>2</sup>) во всесторонне растянутой стали. Однако эти величины ничтожны по сравнению с плотностью энергии воды  $\varepsilon = \rho \cdot c^2 = 9 \cdot 10^{20}$  г/(см·с<sup>2</sup>), стали  $\varepsilon = 7 \cdot 10^{21}$  г/(см·с<sup>2</sup>). Скалярное поле способно создать отрицательное давление, по абсолютной величине гигантское ( $\sim 10^{105}$  г/(см·с<sup>2</sup>)) и равное его плотности энергии,  $p = -\varepsilon$ .

Почему отрицательная плотность энергии играет такую фундаментальную роль в космологии? Можно выделить два главных момента.

а) В общей теории относительности относительное ускорение двух соседних частиц зависит не от *плотности* вещества между ними, а от суммы

$$\rho + \frac{3p}{c^2} = \frac{1}{c^2} (\varepsilon + 3p).$$

Если  $p = -\varepsilon$ , то  $\varepsilon + 3p = -2\varepsilon$ , эта величина становится отрицательной. Значит, гравитационная сила расталкивает частицы. В расширяющемся мире расстояние между каждой парой частиц увеличивается все быстрее, по экспоненциальному, инфляционному

---

\*) Пусть менее подготовленный читатель пропустит ниже следующее доказательство и поверит на слово выводам, начинающимся после следующей сноски.

\*\*) Включаем школьников и неспециалистов в чтение.

закону. Напомним, что Вселенная, заполненная галактиками, совокупность которых можно рассматривать как газ с давлением, пренебрежимым по сравнению с плотностью энергии, т. е. с  $p = 0$ , расширяется в среднем по закону  $a \propto t^{2/3}$ ,  $da/dt \propto t^{-1/3}$ . Заполненная плазмой с  $p = \epsilon/3$  она расширяется по закону  $a \propto \sqrt{t}$ , так что  $da/dt \propto 1/\sqrt{t}$ . В обоих случаях,  $p = 0$  и  $p = +\epsilon/3$ , расширение замедленное.

Нужно именно большое отрицательное давление, в данном случае  $p = -\epsilon$ , чтобы расширение было ускоренным.

б) Вторая причина состоит в энергетических соображениях. Рассмотрим кусок обычного вещества с положительным или нулевым давлением. По мере расширения его плотность уменьшается. Если давление равно нулю, то плотность уменьшается по той простой причине, что данное количество вещества с течением времени занимает все больший объем. Плотность равна массе, деленной на объем, увеличение знаменателя дроби при постоянном числителе уменьшает дробь.

Если давление положительное, то уменьшение плотности происходит еще быстрее.

При расширении вещество совершает работу, равную произведению давления на увеличение объема. Так, при расширении продуктов сгорания в цилиндре двигателя газы охлаждаются. Но мы знаем об эквивалентности массы и энергии. Уменьшение энергии означает и уменьшение массы. Дробь  $\rho = M/V$  в данном случае уменьшается как вследствие увеличения знаменателя, так и за счет числителя.

Теперь становится понятной роль отрицательного давления. В ходе расширения приходится растягивать объем, совершать над ним работу, увеличивать энергию того вещества (в данном случае скалярного поля), которым заполнен рассматриваемый объем. Здесь выявляется особая роль того, что давление как раз равно отрицательной плотности энергии,  $p = -\epsilon$ . Именно при таком соотношении изменение числителя в точности компенсирует изменение знаменателя и плотность энергии длительно остается постоянной. Расширение длительно остается экспоненциальным, инфляционным.

Остается добавить, что до настоящего времени скалярное поле не наблюдалось. Не наблюдались и кванты этого поля — скалярные частицы. Скалярные

частицы, например, пионы, наблюдаемые на опыте, несомненно, составные, состоят из кварков и антикварков. Если создать большую плотность нейтральных пионов, получится «кварковый суп» с положительным давлением.

То скалярное поле, которое нужно космологии, в разных вариантах получается в теории, но существование его (или их — если много полей) не подтверждено опытом, детальные свойства полей не известны.

Итак, второе замечание состоит в том, что инфляционное состояние с положительной плотностью энергии и отрицательным давлением, конечно же, неустойчиво. Это очевидно и с точки зрения механики, это очевидно и с точки зрения термодинамики. При равной плотности энергии вместо упорядоченного скалярного поля можно взять горячую плазму и энтропия гигантски увеличится!

«Слава богу!» — одинаково скажет и верующий, и атеист. Благодаря неустойчивости инфляционного состояния оно с течением времени превращается в горячую плазму, а затем в окружающую нас Вселенную. Температура падает до 3 К, остатком процессов при высокой температуре является вещество — и вот рождается Солнце, Земля, человечество, цивилизация. Детали этого процесса описывать в данной книге было бы неуместно.

### **Плотность энергии вакуума и космологическая постоянная**

Остановимся на последнем из упомянутых выше вопросов, связывающем теорию полей и частиц с астрономией. Это самый трудный и самый коварный вопрос. Само существование этого вопроса остро осознано лишь в последние 10—20 лет. Речь идет о плотности энергии вакуума.

В классической физике вопрос был тривиален: вакуум — это пустота, нет частиц, равны нулю поля — значит, нет и энергии. Однако стоит нам начать последовательно развивать квантовую теорию, как банальные истины летят вверх тормашками.

Начнем с электромагнитного поля. Электрическое и магнитное поля играют роль импульса и координаты, по принципу неопределенности они не могут одновременно обращаться в нуль! Конечно, средние  $E$  и  $B$



равны нулю, но ведь плотность энергии выражается через квадраты:  $(\vec{E}^2 + \vec{B}^2)/8\pi$ . На другом языке: можно разложить поля на совокупность отдельных электромагнитных волн.

В линейной теории эти волны независимы друг от друга и каждая из них ведет себя как осциллятор — как частица, которую квадратичный потенциал удерживает в положении равновесия (рис. 38). Движение такой частицы, очевидно, представляет собой колебание с определенной частотой. В классической теории минимум энергии соответствует частице, покоящейся в нижней точке, этот минимум равен нулю.

Но в квантовой теории спектр возможных состояний частицы дается формулой

$$E_n = \hbar\omega \left( n + \frac{1}{2} \right).$$

Нижнее энергетическое состояние соответствует  $n = 0$ ,  $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$ . Только такое низшее состояние совместимо с квантовой теорией, с принципом неопределенности.

Полная плотность энергии в единице объема с учетом связи между частотой и волновым вектором  $k$  ( $\omega = c|k|$ ) расходится, она бесконечна!  $\varepsilon_0 \sim k_{\max}^4$ , где  $k_{\max} = \infty$  — максимальное значение волнового вектора.

Может быть, где-то есть ошибка, еще не найденная теоретиками, и «нулевую» энергию, нулевые колебания не надо учитывать? Вряд ли такой ответ сегодня удовлетворит нас. Дело в том, что многие проявления нулевых колебаний подтверждены опытом. Возьмем, например, медную коробочку и заключим в эту коробочку свободные электромагнитные колебания. Низкочастотная часть спектра при этом изменится: вместо бегущих волн с определенным волновым вектором получим серию стоячих волн, зависящих от конкретной формы и размера медного ящичка. А высокочастотные волны практически не изменятся. Таким образом, нулевая энергия совокупности волн в ящичке

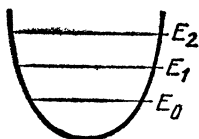


Рис. 38. В потенциальной яме имеется дискретный спектр квантовых состояний.  $E_0$  — энергия нижнего состояния,  $E_1$  и  $E_2$  — энергии соответственно 1 и 2 возбужденных состояний

выражается суммой  $E = \frac{1}{2} \sum E_n$ . Сумма эта также бесконечна, но оказывается, что конечна разность

$$\Delta E = E - \varepsilon_0 V,$$

где  $\varepsilon_0$  — бесконечная сумма для вакуума без коробочки,  $V$  — объем коробочки.

Вот эта конечная величина  $\Delta E$  зависит определенным образом от размера и формы коробочки. Но если энергия зависит от размеров и формы, значит при изменении размеров и формы стенки производят работу, значит при температуре равной нулю на стенки действуют определенные силы.

Мы можем сказать, что это силы взаимодействия между стенками. Это не изменит сути: вычисления, использующие по ходу дела бесконечную энергию нулевых колебаний, дают ответ, согласующийся с опытом. Значит, просто выбросить нулевые колебания нельзя.

Саму бесконечную плотность энергии можно было игнорировать, рассматривая только *разности* энергий или в разных коробочках, или до и после того или иного процесса в одной и той же коробочке. Таким образом удается получать разумные, не бесконечные результаты. Рассказанная выше процедура составляет часть так называемой программы *ренормализации*.

Однако беда приходит тогда, когда мы переходим к рассмотрению вопросов тяготения, будь то общая теория относительности или теория тяготения Ньютона. В эту теорию входит не разность  $\Delta E$ , а сама бесконечная плотность энергии.

Здесь возможный выход состоит в том, что энергия вакуума определяется *полной* плотностью энергии всех полей. Действительно, верно, что одна электродинамика (квантованная!) несовместима с теорией тяготения. Но ведь мы живем в мире, где существует не только электродинамика, не только фотоны! Существуют еще и электроны, и позитроны. Напомним, что для описания таких частиц и античастиц пришлось ввести «море Дирака». Это «море» — наличие в вакууме совокупности частиц, заполняющих все состояния с отрицательной энергией (рис. 39). Значит, в плотность энергии вакуума теория Дирака вносит бесконечный отрицательный вклад. Этот отрицательный вклад сохраняется и в более рафинированной зарядово-симметричной теории электронов и позитронов.

Подведем итог. По определению, вакуум есть состояние с наименьшей плотностью энергии \*). Однако в принципе минимум функции вовсе не обязан быть равным нулю (рис. 40). В принципе вполне возможно, что все бесконечные положительные вклады бозонов (таких, как фотоны) компенсируются отрицательными вкладами фермионов (таких, как электроны «моря Дирака»).

Современные, так называемые суперсимметричные, теории частиц строятся так, что число бозонов и число фермионов тождественно равны. Это, в частности, означает компенсацию их вкладов в энергию вакуума. Однако отсюда еще далеко до решения задачи.

Суперсимметрия, несомненно, нарушается при энергиях меньших планковской. Почему же при этом не нарушается точная компенсация вклада бозонов и фермионов? По существу, теория суперсимметрии

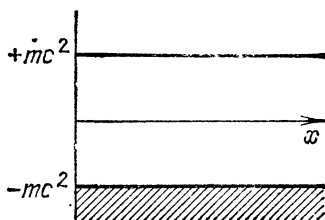


Рис. 39. Рождение пары частица — античастица при их массе  $m$  требует преодоления энергетического порога  $2mc^2$

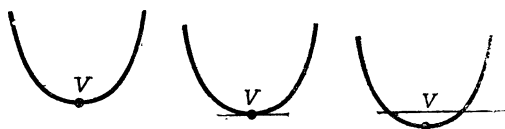


Рис. 40. Вакуум отвечает минимуму потенциальной энергии, но величина этого минимума в принципе не обязана быть равной нулю. Она может быть как больше, так и меньше нуля

говорит лишь о том, что плотность энергии вакуума не равна «планковской»,  $10^{114}$  г/(см·с<sup>2</sup>). Однако теория совсем не исключает возможности плотности энергии порядка, например, ядерной —  $10^{35}$  г/(см·с<sup>2</sup>).

Астрономия — и только астрономия — говорит о том, что плотность энергии вакуума заведомо меньше  $10^{-28}$  г/(см·с<sup>2</sup>) \*\*).

\*) Любое отклонение от минимума (опять же по определению минимума) положительно. Такое отклонение может быть названо частицей в вакууме.

\*\*) При этом в пределах от  $-10^{-29}$  до  $+10^{-28}$  даже знак остается неизвестным.

Физика не способна этого доказать или обосновать. Может быть, это сделают наши молодые читатели? Не сегодня, а после 5—10 лет труда? На научном языке проблема именуется «вопрос о космологической постоянной».

Наконец, последнее предупреждение молодым и немолодым читателям: не конструируйте машин, извлекающих из вакуума энергию. Это безграмотно уже сегодня, независимо от вопроса о вычислении энергии (см. об этом выше (рис. 40) — определение вакуума как состояния с *минимальной* допустимой плотностью энергии). Лучше придумайте, как использовать, да еще, по возможности, управляемым регулируемым способом, всю энергию  $E = Mc^2$  вещества. Это трудно — но по крайней мере не противоречит общим законам природы. При взрыве урана и плутония используется меньше 0,1 %  $Mc^2$ , превращение водорода (в том числе дейтерия и трития) в гелий может дать до 0,6 %  $Mc^2$ . При взрывах звезд и при падении вещества на нейтронные звезды и черные дыры к. п. д. достигает 20—30 %. Дерзайте — и добивайтесь десятков (если не 100 %) процентов  $Mc^2$  в земных условиях!

Таковы идеи, которыми живет и на фоне которых развивается современная физика. Хочется закончить наш рассказ об эволюции этих идей, о сложном процессе их становления какими-то предсказаниями об их будущем развитии. Но, может быть, стоит лучше согласиться с Дж. К. Максвеллом:

«...человеческой мысли несвойственно неизменно устанавливаться в состоянии неизменного уравновешенного покоя, которое мы можем предсказать заранее. Наша мысль скорее подобна дереву, выпускающему побеги, которые тянутся к свету, или же корням дерева, извивающимся среди различных пластов земли, в которые они зарываются. Мы, которые дышим воздухом нашего века и знаем только характеристики современного мышления, — мы не можем предсказать общий тон науки будущего, так же как не можем предвидеть тех открытий, которые принесет это будущее.»

Предлагаемое дополнение не может и не должно заменять учебники. Определения даны грубо, с единственной целью дать возможность понимать основной текст тем, кто кончал среднюю школу до ее реформы.

## Векторы

Величина, характеризуемая числовым значением (модулем) и направлением, называется **вектором** (3-вектором). Векторы можно представлять себе как направленные отрезки — стрелки. Длина отрезка характеризует абсолютную величину вектора — числовое значение величины. Направление стрелки дает направление рассматриваемой векторной величины (рис. П.1). Перемещение, скорость, ускорение, сила, плотность тока, напряженности электрического и магнитного полей — примеры векторов. Величина, характеризующаяся только числовым значением и не имеющая направления в пространстве, называется **скаляром** (3-скаляром). Масса, заряд, температура, энергия — примеры пространственных скаляров.

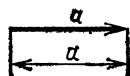


Рис. П.1.  
Вектор  $\mathbf{a}$  изображается стрелочкой длиной  $a = |\mathbf{a}|$ , а направление стрелочки определяет направление вектора

Если имеется несколько векторов (например, несколько сил, действующих на тело в разных направлениях), то их сумма (например, результирующая сила, действующая на тело) определяется по правилу *сложения векторов* (рис. П.2): к концу первой стрелки надо приложить начало второй стрелки, сохраняя ее направление, затем к концу второй стрелки приложить начало третьей стрелки (сохраняя ее направление) и т. д. Со-

единяя стрелкой начало первой стрелки с концом последней, получаем вектор суммы. Легко убедиться в том, что вектор суммы получается одним и тем же независимо от того, с какого из векторов мы начнем и

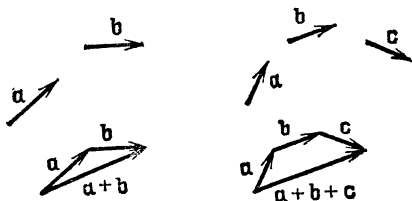
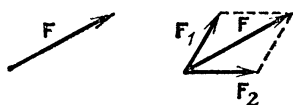


Рис. П.2. Правило сложения векторов

независимо от того, в каком порядке мы будем присоединять стрелки. Для двух векторов правило сложения векторов сводится к хорошо известному правилу параллелограмма сил — результирующая сила совпадает с диагональю параллелограмма, построенного на векторах рассматриваемых сил.



$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

Рис. П.3. Каждый вектор  $\mathbf{F}$  можно разложить на составляющие. Составляющие  $\mathbf{F}_1$  и  $\mathbf{F}_2$  складываются в вектор  $\mathbf{F}$  по правилу сложения векторов

Умножить вектор на положительное число значит умножить на это число его абсолютную величину (длину стрелки), оставив направление вектора неизменным. Умножение вектора на отрицательное число означает умножение абсолютной величины вектора на

абсолютную величину (модуль) отрицательного числа и замену направления вектора на противоположное. Вводят и нулевой вектор — результат умножения любого вектора на нуль — его длина равна нулю, а направление произвольно.

Векторную величину можно описать и по-другому. Всякий вектор можно представить по правилам сложения в виде суммы двух или нескольких других векторов — разложить на *составляющие* (рис. П.3). Определим в пространстве длину, ширину и высоту. Выбор направлений в длину, в ширину и в высоту означает выбор направлений осей координат. Тем самым мы ввели *систему координат*. Найдем проекции вектора на эти оси (рис. П.4, а). Если направление проекции совпадает с направлением оси, то проекция имеет

знак «плюс». Если направление проекции и оси противоположны, то проекция имеет знак «минус». Вектор может лежать в плоскости двух осей, тогда его проекция на третью ось будет равна нулю. Таким образом, любой вектор  $\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} + F_z \mathbf{k}$ , где  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{k}$  — единичные векторы, направленные соответственно вдоль

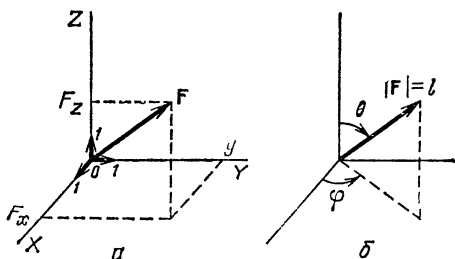


Рис. П.4. Различные способы задания векторов. а — вектор  $\mathbf{F}$  задается тройкой проекций  $F_x$ ,  $F_y$  и  $F_z$  на оси координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . б — вектор задается его длиной  $|\mathbf{F}| = l$ , азимутальным  $\varphi$  и полярным  $\theta$  углами, фиксирующими его направление в пространстве

осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , а  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  — тройка проекций вектора  $\mathbf{F}$  на эти оси.

В таком описании вектор определяется тройкой чисел — тройкой  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  его проекций на оси координат. Но ведь мы можем изменить выбор системы координат — повернуть ее, сдвинуть ее начало, изменить единицы измерения длины проекций. Тогда изменятся и проекции вектора на оси. Преобразование системы координат вызывает преобразование проекций векторной величины. Сам вектор — стрелка — при таких преобразованиях не изменился, изменилась система координат, в которой мы его описываем. По данной стрелке мы можем определить проекции вектора при любом выборе системы координат. Но можно поступить и наоборот — в данной системе координат ввести тройку чисел (тройку проекций) и задать закон их изменения при координатных преобразованиях \*).

\*) Зависимость тройки чисел, описывающих вектор, от выбора системы координат является важнейшим фактом. Можно задать тройку скаляров, например, температуру, давление и плотность. Преобразование пространственных координат не изменит ни одну из этих величин. Это и есть фундаментальное отличие числа — скаляра — например, температуры, от числа — проекции вектора на ось, например, проекции вектора скорости  $\mathbf{v}$  на ось  $X$ ,  $v_x$ .

Это другое описание вектора. Описание вектора стрелками очень наглядно. Описание вектора набором чисел оказывается очень полезным для различных обобщений понятия вектора, которые встречаются при описании зарядов и токов элементарных частиц. Векторная величина может быть функцией времени и пространства. Это означает, что с каждым моментом времени и с каждой точкой пространства связана своя стрелка, или своя тройка чисел с определенным законом изменения при координатных преобразованиях.

Этот закон определяет систему соотношений, связывающих компоненты вектора  $\mathbf{a}$  в одной системе координат  $a_x(1)$ ,  $a_y(1)$ ,  $a_z(1)$  с компонентами этого вектора  $a_x(2)$ ,  $a_y(2)$ ,  $a_z(2)$  в некоторой другой системе координат:

$$a_x(2) = T_{xx}a_x(1) + T_{xy}a_y(1) + T_{xz}a_z(1),$$

$$a_y(2) = T_{yx}a_x(1) + T_{yy}a_y(1) + T_{yz}a_z(1),$$

$$a_z(2) = T_{zx}a_x(1) + T_{zy}a_y(1) + T_{zz}a_z(1).$$

Девятка коэффициентов  $T_{xx}$ , ...,  $T_{zz}$  при преобразованиях системы координат в свою очередь также изменяется по определенному закону и составляет тензор (см. ниже).

При всевозможных поворотах и сдвигах системы координат длина вектора  $l^2 = x^2 + y^2 + z^2$  не меняется. Величина, которая зависит от преобразуемых величин и не меняется при преобразованиях, является скаляром относительно рассматриваемых преобразований. Длина вектора — скаляр относительно преобразований координат, не меняющих единицы измерения длины проекций.

Рассмотрим вектор единичной длины, начало которого совпадает с началом координат. Тогда конец этого вектора находится на сфере единичного радиуса. Каждая точка этой сферы отвечает определенному направлению единичного вектора в пространстве. Чтобы определить это направление, необходимо задать на сфере два угла — азимутальный  $\varphi$  и полярный  $\theta$  (рис. П.4, б). Тем самым вектор единичной длины задается двумя углами. Произвольный вектор может быть задан его длиной  $l$  и двумя углами на сфере радиуса  $l$ .



Это еще один способ определения вектора — в сферической системе координат (см. рис. П.4, б). С другой стороны, можно определить положение любой точки с помощью радиус-вектора, начало которого совпадает с началом координат, а конец совпадает с данной точкой.

### Скалярное произведение

Чтобы помножить два числа, мы используем таблицу умножения — правило, по которому этим двум числам сопоставляется некоторое третье число — их произведение. Скалярное умножение двух векторов определяется правилом, по которому этим векторам сопоставляется некоторый скаляр — некоторое число — их скалярное произведение.

*Скалярное произведение* двух векторов  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  принято обозначать  $\mathbf{ab}$ , или  $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ , или  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ . Задаваясь абсолютной величиной и направлением в пространстве двух векторов, можно определить их скалярное произведение как произведение абсолютных величин двух векторов и косинуса угла между их направлениями.

Например, пусть  $F$  — абсолютная величина вектора силы  $\mathbf{F}$ ,  $r$  — абсолютная величина вектора перемещения  $\mathbf{r}$  и  $\theta$  — угол направления действия силы и перемещения. Скалярное произведение векторов силы  $\mathbf{F}$  и перемещения  $\mathbf{r}$  есть величина работы силы  $A = \mathbf{Fr} = Fr \cos \theta$ .

Легко видеть, что скалярное произведение векторов  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  можно определить как произведение длины вектора  $\mathbf{a}$  и проекции  $\mathbf{b}$  на направление  $\mathbf{a}$ , т. е.  $ab_a$ , или как произведение длины  $\mathbf{b}$  и длины проекции вектора  $\mathbf{a}$  на направление вектора  $\mathbf{b}$ , т. е.  $ba_b$ . Так, работа силы  $\mathbf{F}$  при перемещении  $\mathbf{r}$  равна произведению модуля силы  $F$  и проекции перемещения на направление действия силы  $\mathbf{F}$ :

$$A = Fr_F,$$

и эта же работа равна произведению величины перемещения  $r$  и величины проекции силы  $F$  на направление перемещения:  $A = F_r r$ .

Наконец, если мы выбрали прямоугольную систему координат (оси координат направлены под прямым углом друг к другу) и определили наши векторы по

их проекциям на оси координат, скалярное произведение оказывается равным сумме произведений проекций на те же оси.

Например, пусть электрическая сила  $\mathbf{F}$  имеет составляющую  $F_x$  в направлении оси  $X$ , составляющую  $F_y$  в направлении оси  $Y$  и составляющую  $F_z$  в направлении оси  $Z$ , и мы совершили перемещение  $\mathbf{r}$ , так что заряд сместился на расстояние  $x$  вдоль оси  $X$ , на расстояние  $y$  вдоль оси  $Y$  и на расстояние  $z$  вдоль оси  $Z$ . Тогда скалярное произведение векторов силы  $\mathbf{F}$  и перемещения  $\mathbf{r}$ , т. е. работа силы  $\mathbf{F}$  при перемещении  $\mathbf{r}$ , есть  $A = \mathbf{F}\mathbf{r} = F_x x + F_y y + F_z z$ .

Все приведенные определения скалярного произведения эквивалентны. Они дают один и тот же ответ.

Работа силы  $\mathbf{F}$  складывается из работы вдоль направления оси  $X$ , работы вдоль направления оси  $Y$  и работы вдоль направления оси  $Z$ . Замечательно, что мы можем повернуть систему координат и проекции векторов на оси изменятся, но величина скалярного произведения остается той же самой. Как мы уже говорили выше, в этом важнейшее свойство скалярных величин — при всевозможных поворотах осей координат они остаются неизменными. В частности, при всевозможных поворотах не меняется скалярное произведение вектора  $\mathbf{a}$  на самого себя:  $\mathbf{a}\mathbf{a}$ , равное квадрату длины вектора  $\mathbf{a}$ , т. е.  $a^2$ . Тем самым неизменность (инвариантность) длины вектора при поворотах системы координат оказывается частным случаем инвариантности скалярного произведения векторов (и вообще скалярных величин) относительно таких преобразований.

Каждый вектор можно представить как сумму двух или нескольких составляющих его векторов. Например,  $\mathbf{a} = \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + \dots + \mathbf{a}_n$  и  $\mathbf{b} = \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 + \dots + \mathbf{b}_n$ . В этом случае скалярное произведение векторов  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  можно представить как сумму попарных произведений отдельных составляющих векторов:  $\mathbf{a}\mathbf{b} = \mathbf{a}_1\mathbf{b}_1 + \mathbf{a}_2\mathbf{b}_1 + \dots + \mathbf{a}_n\mathbf{b}_1 + \mathbf{a}_1\mathbf{b}_2 + \dots + \mathbf{a}_n\mathbf{b}_2$ . Записав  $\mathbf{a} = i\mathbf{a}_x + j\mathbf{a}_y + k\mathbf{a}_z$  и  $\mathbf{b} = i\mathbf{b}_x + j\mathbf{b}_y + k\mathbf{b}_z$ , получаем по этому правилу (учитывая  $ii = jj = kk = 1$ ;  $ij = ik = jk = 0$ )  $\mathbf{a}\mathbf{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$ .

Меняя в скалярном произведении векторов направление одного из векторов, мы меняем знак скалярного произведения.

Приведем пример применения понятия скалярного произведения. С помощью векторного исчисления доказательство теоремы Пифагора упрощается. Для гипотенузы  $c$  и двух катетов  $a$  и  $b$  справедливо соотношение  $c = a + b$ , при этом направленные вдоль катетов векторы  $a$  и  $b$  перпендикулярны и скалярные произведения  $ab = ba = 0$ . Поэтому  $c^2 = c^2 = (a + b)^2 = a^2 + ab + ba + b^2 = a^2 + b^2$ .

Понятия скаляра и вектора, а также скалярного произведения двух векторов непосредственно обобщаются на пространство любого числа измерений: плоское (2-мерное), 4-мерное и т. д. Выше все изложено велось для нашего привычного 3-мерного пространства.

### Векторное произведение

Имеется и другая операция умножения двух векторов, при которой произведение этих векторов также является вектором. Эта операция называется *векторным умножением* двух векторов.

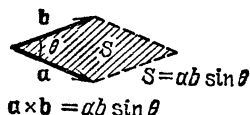


Рис. П.5 Абсолютная величина векторного произведения векторов  $a$  и  $b$  равна площади параллелограмма, построенного на векторах  $a$  и  $b$

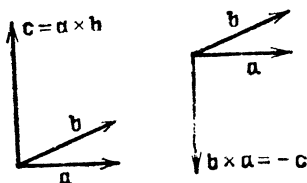


Рис. П.6. Направление вектора  $a \times b$  определяется по правилу правого винта. Вектор  $b \times a$  имеет направление, противоположное направлению вектора  $a \times b$

Векторным произведением двух векторов  $a$  и  $b$  называется третий вектор  $c$ , абсолютная величина которого определяется произведением абсолютных величин векторов  $a$  и  $b$  и синуса угла  $\theta$  между ними:  $c = ab \sin \theta$ . Эта величина совпадает с величиной площади параллелограмма, построенного на векторах  $a$  и  $b$  (рис. П.5). Направление вектора совпадает с направлением поступательного движения «правого» винта при повороте по короткой дуге от первого вектора ко второму (рис. П.6), т. е. направление вектора  $c$

перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  и совпадает с направлением вектора угла вращения правого винта от  $\mathbf{a}$  к  $\mathbf{b}$ .

Векторное произведение обозначается  $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ , или  $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$  или  $[\mathbf{ab}]$ . Знак векторного произведения в отличие от скалярного зависит от порядка сомножителей:  $\mathbf{a} \times \mathbf{b} = -\mathbf{b} \times \mathbf{a}$ , так как при замене порядка сомножителей направление вращения от первого вектора ко второму меняется на противоположное. Соответственно, меняется на противоположное и направление векторного произведения (рис. П.5, П.6). Отсюда следует, что векторное произведение вектора  $\mathbf{a}$  на самого себя равно нулю:

$$\mathbf{a} \times \mathbf{a} = -\mathbf{a} \times \mathbf{a} = 0.$$

В декартовых координатах  $x$ ,  $y$  и  $z$  компоненты векторного произведения  $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$  выражаются через компоненты векторов  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  следующим образом:

$$\text{по оси } x \quad a_y b_z - a_z b_y,$$

$$\text{по оси } y \quad a_z b_x - a_x b_z,$$

$$\text{по оси } z \quad a_x b_y - a_y b_x.$$

Легко видеть, что векторное произведение можно определить только в трехмерном пространстве.

Примером векторного произведения может служить сила, действующая на электрон в магнитном поле:

$$\mathbf{F} = \frac{e}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{H}.$$

Разберем более подробно другой пример. Вращая головку винта по или против часовой стрелки, мы будем либо закручивать, либо выкручивать винт. С направлением вращения головки винта связано поступательное движение самого винта и, соответственно, некоторое выделенное направление в пространстве, вдоль которого винт перемещается. Чем больше угол поворота, тем больше закручивается или выкручивается сам винт. Поэтому с вращением головки винта можно связать некоторую величину, характеризующую числовым значением — величиной угла поворота головки винта, и направлением в пространстве — направлением поступательного перемещения винта.

С вращением головки винта можно связать векторную величину — вектор угла поворота головки винта. Абсолютная величина этого вектора равна углу поворота, а направлен этот вектор вдоль оси, по которой происходит поступательное движение винта, перпендикулярно плоскости вращения головки винта. Остается еще элемент произвола, связанный с выбором положительного направления на этой оси. Винт может иметь правовинтовую или левовинтовую (рис. П.7) нарезку. Вращая нарезку таких винтов в одну и ту же сторону (например, так, как это изображено на рис. П.7), мы получим, что «левый» и «правый» винты приобретут поступательное движение в противоположных направлениях. Условимся определять

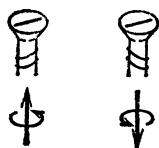


Рис. П.7. Вращая «левый» и «правый» винты в одну сторону, мы получаем поступательное движение в противоположных направлениях.

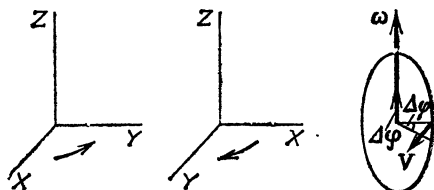


Рис. П.8. Направление вектора угла поворота  $\Delta\varphi$  и вектора угловой скорости  $\omega$  определяется по правилу правого винта, в соответствии с выбором осей в правой системе координат

направление вектора угла вращения по поступательному движению «правого» (рис. П.7) винта. Это условие отвечает выбору «правой» системы координат — системы декартовых координат, в которой выбор направлений осей  $X$  и  $Y$  определяет «правовинтовое» направление оси  $Z$ : ось  $Z$  должна быть направлена так, как был бы направлен вектор угла вращения правого винта при повороте осей  $X$  и  $Y$  в плоскости в направлении от положительного направления оси  $X$  к положительному направлению оси  $Y$  (рис. П.8). В «левой» системе координат направление такого поворота противоположно (рис. П.8). Векторное произведение определяется по правовинтовому направлению. Так же определяются и вектор угла поворота  $d\varphi$ , и вектор угловой скорости  $\omega = d\varphi/dt$ . Определяя вектор линей-

ной скорости  $\mathbf{v}$  смещением точки с радиус-вектором  $\mathbf{r}$  вращающегося тела  $\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$ , мы получаем другой пример векторного произведения

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}.$$

Подчеркнем условность выбора положительного направления вектора угловой скорости. Этот выбор совпадает с выбором положительного направления векторного произведения. Поэтому направление вектора скорости  $\mathbf{v}$  не зависит от выбора «правой» или «левой» системы координат: произвол в выборе знака угловой скорости компенсируется произволом в выборе направления векторного произведения.

### Тензоры

В общем случае двум векторам  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$ , каждый из которых определяется тройкой его проекций на оси координат, можно сопоставить объект, определяемый девятью всевозможными попарными произведениями проекций этих векторов ( $a_x b_x, a_x b_y, a_x b_z, \dots$ ). Такой объект  $T_{ik}$ , удовлетворяющий определенному закону преобразований его девяти компонент при преобразовании координат, называется *тензором 2 ранга*. Простейший пример тензора — девятка коэффициентов  $T_{ik}$  преобразования одного вектора в другой: компоненты двух векторов  $a_i$  и  $b_i$  связаны соотношением  $a_i = T_{ik} b_k$ . Общая теория тензоров любого ранга включает и векторы (т. е. тензоры 1 ранга) и скаляры (т. е. тензоры 0 ранга).

С помощью тензоров многие физические соотношения могут быть записаны в весьма компактной форме, однако обсуждение свойств тензоров и физических приложений тензорного анализа выходит далеко за рамки нашего изложения.

### 4-векторы

Описание пространственно-временных свойств использует понятие события. *Событие* характеризуется положением в пространстве и моментом времени. Три пространственные координаты  $x, y, z$  и момент времени  $t$ , когда событие происходит, составляют четверку величин, являющуюся простейшим примером 4-вектора. Согласно теории относительности при переходе из одной инерциальной системы в другую — при преобразованиях Лоренца — понятие одно-

временности событий меняется: временные и пространственные координаты преобразуются по определенному закону.

4-вектор  $a_\mu$  можно определить как совокупность 4-х величин,  $a_1, a_2, a_3$  и  $a_0$ . При преобразованиях пространственных координат три величины  $a_1, a_2$  и  $a_3$  преобразуются как компоненты вектора  $\mathbf{a}$ , а четвертая,  $a_0$ , является скаляром. Компонента  $a_0$  называется временной компонентой 4-вектора, а компоненты вектора  $\mathbf{a}$  составляют пространственные компоненты этого 4-вектора. Энергия-импульс, 4-вектор плотности тока являются примерами 4-векторов.

Два события, происходящие на расстоянии  $\Delta r = r_1 - r_2$  через промежуток времени  $\Delta t = t_1 - t_2$ , измеренные в некоторой инерциальной системе отсчета, разделены интервалом

$$\Delta s^2 = c^2 (\Delta t)^2 - (\Delta r)^2.$$

*Интервал* является аналогом расстояния в обычном пространстве. При преобразованиях Лоренца величина интервала не меняется, как не меняется расстояние при изменении системы координат в пространстве. В отличие от квадрата расстояния, который определяется как сумма квадратов расстояний вдоль всех пространственных осей

$$(\Delta r)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2$$

и который не может принимать отрицательных значений, величина интервала может быть и отрицательной. Если интервал положительный  $\Delta s^2 = c^2 (\Delta t)^2 - (\Delta r)^2 > 0$ , т. е.  $c^2 (\Delta t)^2 > (\Delta r)^2$ , то события разделены *временноподобным интервалом*, если  $c^2 (\Delta t)^2 - (\Delta r)^2 = 0$  и  $(\Delta r)^2 = c^2 (\Delta t)^2$ , то они разделены *светоподобным интервалом*, а при  $c^2 (\Delta t)^2 - (\Delta r)^2 < 0$  и  $c^2 (\Delta t)^2 < (\Delta r)^2$  они разделены *пространственноподобным интервалом*.

Интервал является примером квадрата 4-вектора, имеющего временную координату  $c\Delta t$  и пространственные координаты  $\Delta r$ . Аналогично определяется инвариантная при преобразованиях Лоренца величина квадрата любого 4-вектора  $a_\mu = (a_0, \mathbf{a})$ :  $a_\mu^2 = a_0^2 - \mathbf{a}^2$ .

Сумма двух 4-векторов  $a_\mu$  и  $b_\mu$  есть 4-вектор с временной компонентой  $a_0 + b_0$  и пространственными компонентами  $\mathbf{a} + \mathbf{b}$  (определяемыми по правилу сложения обычных векторов).

Скалярное произведение 4-векторов  $a_\mu = (a_0, \mathbf{a})$  и  $b_\mu = (b_0, \mathbf{b})$  определяется как разность произведения временных компонент  $a_0 b_0$  и скалярного произведения пространственных компонент  $\mathbf{a} \mathbf{b}$ :

$$a_\mu b_\mu = a_0 b_0 - \mathbf{a} \mathbf{b}.$$

Определения скалярного произведения и квадратов 4-векторов, отражают псевдоевклидовость пространства-времени.

## Пространство-время

Некоторое представление о специфике псевдоевклидова пространства-времени дает приведенный здесь простой пример движения по одной пространственной оси. В этом случае события изображаются точками на плоскости  $x$  и  $t$  (рис. П.9). Линии

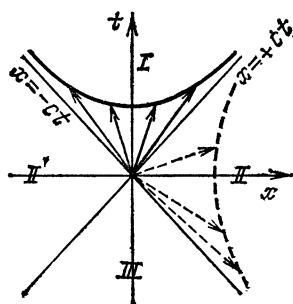


Рис. П.9. Пространство-время. Все сплошные стрелочки соединяют начало координат с событиями, отделенными от начала одинаковым положительным интервалом; штриховые — одинаковым отрицательным интервалом

$x = \pm ct$  разделяют события, отделенные от события в начале координат, пространственноподобными (II, II') и времениподобными (I и III) интервалами.

Казалось бы, две диагонали  $x = \pm ct$  определяют ось  $x$  и ось  $t$  как биссектрисы соответствующих прямых углов и, таким образом, выделяют определенную систему отсчета, связанную с данным событием. Но это не так.

На графике сплошные стрелки — линии одинаковой длины, так как в пространстве-времени длина определяется как квадрат интервала. Для сплошных

стрелок этот квадрат положительный, для штриховых — отрицательный. Нам только кажется, что все сплошные линии (или все штриховые линии) имеют разную длину, потому что мы привыкли к евклидову мероопределению. После преобразования Лоренца осевыми ( $x = \text{const}$ ,  $t = \text{const}$ ) становятся другие векторы, но картина в целом сохраняется. Итак, пло-



скость  $x$ ,  $t$  разбита на области прошлого и будущего и пространственно разделенные (причинно не связанные) части, но это разбиение не мешает относительности движения, не создает выделенной инерциальной системы, как было бы в галилеевой пространственно-временной картине при конечной величине скорости света.

### Производная функции одной переменной

Обратимся к хорошо знакомому простому примеру изменения физической характеристики тела — изменению его положения при механическом движении. Такое изменение характеризуется *скоростью движения* тела.

Если движение прямолинейное, и в равные промежутки времени тело проходит равные отрезки пути, то скорость движения постоянна и движение называется *равномерным*.

Если в ходе прямолинейного движения тело проходит неравные отрезки пути в равные промежутки времени, то движение называют *неравномерным*.

Скорость неравномерного движения можно определить по-разному. Можно взять полное перемещение от  $x_1$  до  $x_2$ :  $x_2 - x_1$  и, поделив его на  $t_2 - t_1$  — полное время движения с  $t_1$  до  $t_2$ , определить среднюю скорость движения  $v = (x_2 - x_1) / (t_2 - t_1)$  — скорость, которую имело бы тело, если бы движение было равномерным и прямолинейным. Можно разделить путь на отдельные участки и, поделив перемещение на каждом участке на время прохождения телом этого участка, характеризовать каждый участок своей средней скоростью.

С другой стороны, если нас интересует, какова была скорость движения в тот или иной момент времени, мы должны выбрать столь малый промежуток времени, чтобы в течение этого промежутка времени скорость движения практически не успела измениться. Тогда, поделив перемещение  $\Delta r$ , совершенное телом за этот малый промежуток времени, на величину промежутка времени  $\Delta t$ , мы получим скорость, которую тело имело в интересующий нас момент.

Очевидно, что чем меньший промежуток времени  $\Delta t$  мы выберем, тем более точно мы определим скорость движения в интересующий нас момент времени,

тем более точно  $\Delta r/\Delta t$  будет характеризовать мгновенную скорость в этот момент. Устремляя величину  $\Delta t$  к нулю, мы получим предел величины отношения  $\Delta r$  к  $\Delta t$  \*)

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t}.$$

Этот предел называется *первой производной* перемещения по *времени*. Его величина определяет мгновенную скорость тела в интересующий нас момент времени

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} \equiv \frac{dr}{dt}.$$

Определение мгновенной скорости движения связано с математической операцией нахождения первой производной перемещения по времени. Эта математическая операция называется *дифференцированием*. Таким образом, чтобы найти мгновенную скорость движения, надо продифференцировать перемещение по времени.

Перемещение — величина векторная, и характеризуется как числовым значением, так и направлением в пространстве. При прямолинейном движении вектор  $\Delta r$  направлен вдоль прямой, то же направление имеет и вектор скорости. При криволинейном движении направление вектора скорости совпадает с касательной к траектории движения в точке, в которой находится движущееся тело в интересующий нас момент времени.

Если вектор скорости не постоянный, то можно ввести скорость его изменения. Скорость изменения скорости называется *ускорением*  $a$ . Ускорение — величина векторная \*\*). Вектор ускорения  $a$  направлен в

---

\*) Здесь буквы  $\lim$  — сокращение от латинского слова *limit* — предел — означают, что надо взять предел отношения  $\Delta r/\Delta t$  при  $\Delta t \rightarrow 0$ . Заметим, что если сразу взять  $\Delta t = 0$ , то и  $\Delta r = 0$ , и мы получили бы неопределенную величину  $0/0$ . Поэтому очень важен порядок: *сначала* взять  $\Delta t$  и  $\Delta r$  малые, но не равные нулю, найти отношение этих малых величин и только *потом* устремить  $\Delta t$  к нулю. При этом устремится к нулю и  $\Delta r$ , но их отношение устремится к вполне определенной величине. Здесь мы сознательно не рассматриваем различные исключительные случаи, например, скачкообразное движение тела или поведение функции  $x = \sqrt{t}$  при  $t \rightarrow 0$ .

\*\*) Это видно из того, что изменение скорости  $\Delta v = v_1 - v_2$  — вектор — делится на скалярную величину  $\Delta t$ .

сторону изменения вектора скорости. При *равноускоренном* движении вектор ускорения постоянный — в равные промежутки времени изменение скорости одинаково и по величине, и по направлению.

Если же за равные промежутки времени изменения скорости неодинаковые, движение — не равномерно ускоренное. В этом случае можно точно так же, как мы это обсуждали выше для скорости неравномерного движения, ввести среднее ускорение на интересующем нас участке пути или в интересующий нас промежуток времени. Для этого надо изменение скорости в данный промежуток времени поделить на величину этого промежутка.

Однако в механике Ньютона наиболее важную роль играет ускорение в данный момент — *мгновенное ускорение*. Именно эта величина, помноженная на массу тела, согласно второму закону Ньютона, определяет силу, действующую на тело в данный момент времени в данной точке пространства и определяющую движение тела.

Аналогично мгновенной скорости мгновенное ускорение определяется как предел отношения вектора приращения скорости  $\Delta \mathbf{v}$  к промежутку времени  $\Delta t$ , за которое произошло это приращение, при стремлении величины  $\Delta t$  к нулю. Нужно определить мгновенную скорость  $\mathbf{v}(t)$  в момент времени  $t$  и мгновенную скорость  $\mathbf{v}(t + \Delta t)$  в момент времени  $t + \Delta t$ , определить (по правилу сложения векторов) вектор

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}(t + \Delta t) - \mathbf{v}(t),$$

поделить величину этого вектора на  $\Delta t$  и найти предел отношения  $\Delta \mathbf{v} / \Delta t$ .

Этот предел есть первая производная вектора скорости по времени. Этот предел и определяет величину мгновенного ускорения

$$\mathbf{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \equiv \frac{d\mathbf{v}}{dt}.$$

Заметьте, что для определения мгновенного ускорения надо сделать две операции. Сначала надо найти первую производную от перемещения по времени — мгновенную скорость, а затем надо определить первую производную от мгновенной скорости. Таким образом, мгновенное ускорение определяется двумя

последовательными операциями дифференцирования перемещения по времени.

Поэтому мгновенное ускорение определяется второй производной вектора перемещения по времени, что обозначается следующим образом:

$$\mathbf{a}(t) = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}.$$

Таким образом, описание простейших изменений — перемещений тела при его движении — неизбежно привлекает математическое понятие производной и математическую операцию — дифференцирование. Изменения состояния движения тела в данный момент времени описываются производными перемещения по времени: первой производной перемещения по времени — скоростью и второй производной перемещения по времени — ускорением.

### Закон Ньютона как дифференциальное уравнение

Задавая внешнюю силу как источник изменения состояния движения, второй закон Ньютона связывает силу, действующую на тело в данной точке пространства, с мгновенным ускорением, сообщаемым телу в момент времени, когда тело находится в этой точке. Поскольку мгновенное ускорение есть вторая производная перемещения по времени, закон Ньютона представляет собой уравнение, связывающее вторую производную от перемещения  $d^2\mathbf{r}/dt^2$  (ускорение) с функцией положения — внешней силой  $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ :

$$m \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F}(\mathbf{r}).$$

Мы имеем уравнение, в левой и правой части которого стоят векторные величины. Если мы выберем ортогональную (декартову) систему координат, то, спроецировав вектор перемещения и вектор силы на оси  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  координат, мы получим систему из трех уравнений

$$\begin{aligned} m \frac{d^2x}{dt^2} &= F_x(\mathbf{r}) \{= F_x(x, y, z)\}, \\ m \frac{d^2y}{dt^2} &= F_y(\mathbf{r}) \{= F_y(x, y, z)\}, \\ m \frac{d^2z}{dt^2} &= F_z(\mathbf{r}) \{= F_z(x, y, z)\}, \end{aligned} \tag{*}$$



или температура тела, то мы должны взять производную этой величины по времени и тем самым определить мгновенную скорость изменения этой величины. Но если мы рассматриваем некоторую физическую величину, определенную в каждой точке пространства, то мы можем задать и другой вопрос — как меняется эта величина от точки к точке в пространстве. После обсуждения производных по времени, нетрудно догадаться, что при описании пространственной зависимости, при описании изменения физической величины от точки к точке в пространстве нужно будет привлечь математическое понятие производной. Только теперь аргументом функции будет не время, а пространственная координата, и мы будем изучать изменение величины не через определенные промежутки времени, а при определенном перемещении в пространстве. (Сразу заметим, что изменение зависит *не только* от расстояния, но и от направления перемещения от точки к точке.),

### Поле

Пусть в пространстве определена некоторая величина. Это означает, что мы можем сказать, чему равна эта величина в каждой точке пространства. Например, мы знаем, какая температура в том или ином месте. В этом случае говорят, что задано *поле* этой величины. В нашем примере — поле температур.

Если в пространстве введена прямоугольная (ее называют декартовой по имени французского математика и физика Рене Декарта) система координат  $X, Y, Z$ , так что каждая точка пространства характеризуется значениями своих координат, то поле является функцией координат каждой точки и формально представляет собой функцию трех переменных  $x, y$  и  $z$ .

Если величина, поле которой мы рассматриваем, меняется со временем, то поле этой величины зависит от времени и называется *нестационарным*. Если величина не зависит от времени, ее поле зависит только от пространственных координат и называется *стационарным*.

Можно выбирать разные системы координат, различными будут и выражения для поля как функции координат. Однако сама рассматриваемая величина

в каждой точке пространства зависит именно от точки пространства, а не от способов описания положения этой точки или выбора системы координат.

Рассмотрим в данный момент  $t=t_0$  скалярное поле  $u(M, t_0)=u(x, y, z, t_0)$  (т. е. функция  $u$  — скаляр). В каждой точке пространства  $M$  с координатами  $x, y, z$  поле характеризуется величиной  $u(M)=u(x, y, z)$ . Зададимся вопросом о том, как меняется эта величина от точки к точке. Чтобы ответить на этот вопрос, нам придется привлечь несколько математических понятий, описывающих различные изменения физических величин.

### Градиент скалярного поля

Рассмотрим определенную во всех точках пространства скалярную величину. Если эта величина одинакова во всех точках пространства, то мы имеем *однородное скалярное поле* этой величины. Если значения рассматриваемой величины в разных точках пространства неодинаковы, то ее поле неоднородно. Как же охарактеризовать неоднородность поля? Рассмотрим конкретный пример скалярного поля.

Мы видели, что во всех точках пространства, окружающего неподвижный электрический заряд, можно определить скалярную величину — электрический потенциал. Поэтому можно говорить о скалярном поле электрического потенциала. Рассмотрим неподвижный электрический заряд. На разных расстояниях от заряда потенциал имеет различные значения. Поле электрического потенциала точечного заряда — неоднородное. Величина потенциала меняется с расстоянием от заряда. Поле неподвижного заряда со временем не меняется. Это поле — стационарное. Поэтому поле электрического потенциала неподвижного точечного заряда — пример неоднородного стационарного скалярного поля.

Потенциал неподвижного точечного заряда зависит только от расстояния до такого заряда. Поэтому на сфере, окружающей точечный заряд (с центром сферы, совпадающим с положением заряда), потенциал имеет одно и то же значение. Такая сфера — пример поверхности одинакового потенциала — *эквипотенциальной поверхности*.

Ясно, что неоднородности потенциала тем больше, чем больше изменение потенциала на заданном расстоянии между двумя точками. Возникает простая аналогия с движением тела. Мы движемся тем быстрее, чем большее расстояние мы проходим за заданный промежуток времени. Количественно движение характеризуется скоростью — перемещением за единицу времени. Естественно ввести подобную характеристику и для поля электрического потенциала — некоторую «скорость изменения величины потенциала с расстоянием». Эту «скорость» естественно определить как отношение разности значений потенциала в двух рассматриваемых точках к расстоянию между этими точками, скажем, как разность потенциалов на единичном расстоянии. Но ведь при неравномерном движении перемещение за единицу времени — скорость движения — зависит от времени, и, говоря о скорости, надо уточнить, какой именно момент времени нас интересует. Нечто подобное возникает и в случае неоднородного поля — в разных местах разность потенциалов точек, находящихся на единичном расстоянии, может быть различной. Поэтому надо уточнить, в каком именно месте и в каком именно направлении в данном месте нас интересует скорость изменения потенциала. В кинематике неравномерное движение характеризуется мгновенной скоростью — скоростью в данный момент времени. Аналогично мы можем ввести некоторую «местную скорость пространственного изменения потенциала» — скорость такого изменения в окрестности данной точки. Ясно, что эта скорость будет определена тем точнее, чем меньшую окрестность точки мы выберем. Разовьем дальше нашу аналогию с движением тела. Вспомним, что скорость — величина векторная. Она имеет направление в пространстве, совпадающее с направлением перемещения. Ясно, что и наша «пространственная скорость изменения потенциала» тоже зависит от направления в пространстве. Действительно, выберем некоторую точку  $M$  с потенциалом  $\varphi(M)$  и рассмотрим точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , ..., лежащие на сфере малого радиуса  $r$  с центром в точке  $M$ . В неоднородном поле потенциал этих точек неодинаков, поэтому и величина разности потенциалов  $\varphi(A) - \varphi(M)$  не равна  $\varphi(B) - \varphi(M)$  или  $\varphi(C) - \varphi(M)$ . При этом расстояние от точки  $M$  до точек  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , ... одно и то же,  $r$ , так что мы получаем разную



величину скорости изменения потенциала в разных направлениях: в направлении  $MA$  эта скорость есть  $\frac{1}{r} [\varphi(A) - \varphi(M)]$ , в направлении  $MB$  (рис. П.10, а):  $\frac{1}{r} [\varphi(B) - \varphi(M)]$  и т. п.

Определим местную скорость пространственного изменения потенциала вдоль одного из направлений, например, вдоль направления  $l$  из точки  $M$  в точку  $A$ .

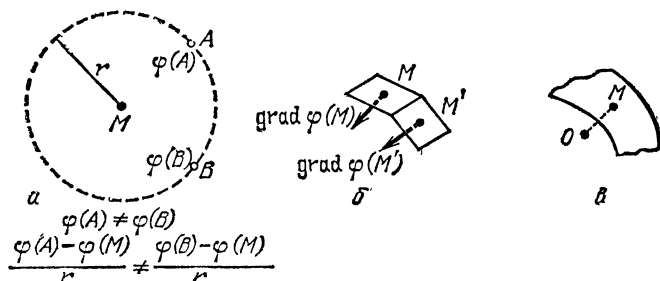


Рис. П.10. Неоднородное потенциальное поле: а — пространственная скорость изменения потенциала в разных направлениях разная; б — скорость изменения потенциала максимальна при минимальной величине  $r$ ; в — эквипотенциальная поверхность; в каждой ее точке вектор градиента направлен по нормали к этой поверхности

Для этого рассмотрим предел отношения разности потенциалов к расстоянию между точками  $M$  и  $A$  при стремлении величины  $r$  к нулю. Этот предел представляет собой пространственную производную потенциала  $\varphi$  в направлении  $l$ :

$$\frac{d\varphi}{dl} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{r} [\varphi(A) - \varphi(M)].$$

Понятие *производной вдоль данного направления инвариантно*, оно определяется независимо от выбора системы координат. В разных направлениях величина этой производной различна. Есть направление, вдоль которого производная максимальна, есть направления, вдоль которых она равна нулю, или же она принимает некие промежуточные значения.

Равенство производной нулю означает, что потенциал в этом направлении не меняется. Рассматривая малую окрестность точки  $M$ , мы получаем, что эти направления определяют малую площадочку, на которой величина потенциала  $\varphi = \varphi(M)$ . Для близлежа-

щей точки  $A$ , в которой  $\varphi(A) \neq \varphi(M)$ , также существует окружающая ее площадочка  $\varphi = \varphi(A) \neq \varphi(M)$ . Если точка  $A$  находится в очень малой окрестности точки  $M$ , то эта площадочка будет параллельна площадочке с  $\varphi = \varphi(M)$ .

Будем перемещать точку  $O$  по площадочке с  $\varphi = \varphi(A)$ , так что всегда  $\varphi(O) = \varphi(A)$ . При этом расстояние  $r$  от точки  $O$  до точки  $M$  будет меняться, а величина  $\varphi(O) - \varphi(M)$  остается неизменной.

Из геометрических соображений (рис. П.10, б) ясно, что отношение  $[\varphi(O) - \varphi(M)]/r$  будет максимальным при минимальной величине  $r$ , т. е. когда точка  $O$  лежит на перпендикуляре к площадочке  $\varphi = \varphi(M)$ . При стремлении  $r$  к нулю мы получаем производную  $d\varphi/dl$ , которая максимальна в направлении, перпендикулярном площадочке  $\varphi = \varphi(M)$ .

«Склеивая» малые площадочки с  $\varphi = \varphi(M)$ , мы получаем поверхность одинакового потенциала — *эквипотенциальную поверхность* (рис. П.10, в). В любой точке этой поверхности производная максимальна в направлении нормали к этой поверхности.

Выберем ортогональную (декартову) систему координат  $XYZ$ . В этой системе точка  $M$  имеет координаты  $x, y, z$ . Точка  $A$  смещена относительно точки  $M$  в направлении  $l$  на малое расстояние (которое мы в пределе устремляем к нулю). Поэтому вдоль оси  $X$  она смещена относительно точки  $M$  на величину  $\Delta x$  проекции на ось  $X$  смещения  $\mathbf{r}$  в направлении  $l$ , вдоль оси  $Y$  на величину  $\Delta y$  проекции этого смещения на ось  $Y$  и вдоль оси  $Z$  на соответствующую проекцию  $\Delta z$  на ось  $Z$ .

Получаем, что координаты точки  $A$ , отличающиеся от координат точки  $M$  на малую величину этих проекций, оказываются равными  $x + \Delta x, y + \Delta y$  и  $z + \Delta z$ . Чтобы определить в этой системе координат местную скорость пространственного изменения потенциала, мы должны найти зависимость разности потенциалов точек  $A$  и  $M$  от координат  $x, y$  и  $z$ . Потенциал есть функция трех независимых аргументов — координат  $x, y$  и  $z$ . Потенциал точки  $M$  равен значению этой функции при значениях ее аргументов  $x, y$  и  $z$ , а потенциал точки  $A$  равен соответствующему значению при  $x + \Delta x, y + \Delta y$  и  $z + \Delta z$ :

$$\varphi(A) = \varphi(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z).$$

Теперь мы должны определить разность потенциалов  $\varphi(A) - \varphi(M)$ .

Покажем, что эта разность состоит из трех частей, пропорциональных соответственно  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta z$ , так что

$$\begin{aligned}\varphi(A) - \varphi(M) &= \varphi(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z) - \varphi(x, y, z) = \\ &= \varphi_x \Delta x + \varphi_y \Delta y + \varphi_z \Delta z.\end{aligned}$$

Поскольку  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta z$  очень малы (это проекции малого смещения  $\mathbf{r}$  на оси координат), мы здесь пренебрегаем членами более высокого порядка малости:  $\Delta x \cdot \Delta y$ ,  $\Delta x \cdot \Delta z$ ,  $\Delta y \cdot \Delta z$ ,  $(\Delta x)^2$ ,  $(\Delta y)^2$ ,  $(\Delta z)^2$ . Величины  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  и  $\varphi_z$  определяются так:

$$\varphi_x \equiv \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{y,z} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\varphi(x + \Delta x, y, z) - \varphi(x, y, z)}{\Delta x},$$

$$\varphi_y \equiv \left. \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right|_{x,z} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\varphi(x, y + \Delta y, z) - \varphi(x, y, z)}{\Delta y},$$

$$\varphi_z \equiv \left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{x,y} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\varphi(x, y, z + \Delta z) - \varphi(x, y, z)}{\Delta z}.$$

Рассмотрим, например, величину  $\varphi_x$ . Она определена как предел отношения  $\frac{1}{\Delta x} \{ \varphi(x + \Delta x, y, z) - \varphi(x, y, z) \}$  при  $\Delta x \rightarrow 0$  — это производная  $\varphi(x, y, z)$  по  $x$ . Но это не совсем обычная производная. Она получена в предположении, что  $y$  и  $z$  постоянны.

Такая производная называется *частной производной* функции  $\varphi(x, y, z)$  по  $x$  при постоянных  $y$  и  $z$ .

Аналогично величина  $\varphi_y$  называется частной производной функции  $\varphi(x, y, z)$  по  $y$  при фиксированных  $x$  и  $z$ , а величина  $\varphi_z$  — частной производной  $\varphi(x, y, z)$  по  $z$  при фиксированных  $x$  и  $y$ . Частные производные потенциала являются компонентами *вектора градиента потенциала*  $\text{grad } \varphi$ .

Итак, мы связали изменения потенциала с некоторым вектором — вектором градиента потенциала, определяемым пространственными (частными) производными потенциала. Этот вектор можно определить в любой точке пространства, в которой определена скалярная величина — потенциал этой точки. Значит, со скалярным электрическим потенциалом связано поле векторной величины. Что же это за величина? Рассмотрим две близлежащие точки  $A$  и  $M$ . *Разность потенциалов* есть работа электрической силы при

перемещении пробного малого заряда, отнесенная к величине этого заряда. Эта работа равна скалярному произведению вектора перемещения  $\mathbf{r}$  из точки  $M$  в точку  $A$  и вектора электрической напряженности (электрической силы, действующей на пробный заряд)  $\mathbf{E}(M)$ :

$$\varphi(A) - \varphi(M) = (\mathbf{E}(M), \mathbf{r}).$$

С другой стороны, при очень малых расстояниях  $r$  между точками  $A$  и  $M$  разность потенциалов точек  $A$  и  $M$  есть проекция градиента потенциала на направление  $\mathbf{r}$ , помноженная на малое расстояние  $r$ :

$$\varphi(A) - \varphi(M) = (\text{grad } \varphi(M), \mathbf{r}),$$

т. е. разность потенциалов между точками  $A$  и  $M$  есть скалярное произведение вектора перемещения из точки  $M$  в точку  $A$  и вектора градиента потенциала.

Итак, мы установили связь между скалярной и векторной характеристиками пространства, окружающего электрический заряд. Скалярное поле электрического потенциала вполне определенным образом связано с векторным полем — полем его градиента.

### **Потенциальное силовое поле. Работа электрической силы**

Теперь рассмотрим связь скалярного потенциала и вектора его градиента с другой стороны. Пусть в каждой точке пространства определена некоторая векторная величина. Тем самым задано векторное поле этой величины. Реальным примером такой величины является сила, с которой действует электрический заряд на пробный заряд, помещенный в любую точку пространства. В каждой точке пространства может быть определен вектор этой силы. Тем самым задается поле электрической силы. Как установить, связано ли с этим полем скалярное поле электрического потенциала? Анализ работы по замкнутому контуру приведет нас сейчас к важной характеристике пространственного изменения векторного поля. С ее помощью можно установить, связано ли с этим полем соответствующее скалярное поле потенциала.

Пусть мы переместили заряд из точки  $A$  в точку  $B$  (рис. П.11) по пути  $a$  и обратно из  $B$  в  $A$  по пути  $b$ . Это перемещение в действительности складывается из последовательности малых перемещений: сначала мы

переместили заряд из точки  $A$  в точку  $a_1$ , совершив малое перемещение  $r_1$ , потом произвели перемещение  $r_2$  из точки  $a_1$  в точку  $a_2$ , потом совершили перемещение  $r_3$  из точки  $a_2$  в точку  $a_3$  и так далее, пока наконец мы не совершим перемещение в точку  $B$  из близкой к ней точки  $a_n$ .

Если такие промежуточные перемещения достаточно малы, так что при каждом перемещении вектор электрической силы меняется слабо, то можно считать, что на каждом таком малом перемещении вектор электрической силы постоянен. При первом перемещении  $r_1$  заряда работу совершает сила  $F_1$ , при втором  $r_2$  — сила  $F_2$  и так далее. Сумма работ на каждом малом перемещении составит полную работу электрической силы при рассматриваемом перемещении  $r$ :

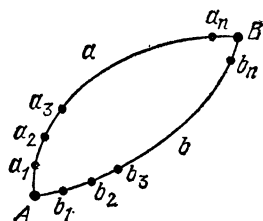


Рис. П.11. Работа по каждому пути ( $a$  и  $b$ ) складывается из работ по перемещению заряда на малых их участках

$$A = F_1 r_1 + F_2 r_2 + \dots + F_n r_n.$$

На обратном пути заряд из  $B$  в  $A$  перемещается другим путем  $b$  (рис. П.11). На этом пути происходят малые перемещения в другие промежуточные точки:  $b_n, \dots, b_2, b_1$  и электрическая сила на каждом перемещении — из  $B$  в  $b_n$ , из  $b_2$  в  $b_1, \dots$  имеет другую величину и другое направление, нежели при перемещениях из  $A$  в  $a_1$ , из  $a_1$  в  $a_2$  и т. д.

Подсчитаем работу электрической силы точечного заряда  $+Q$  при перемещении пробного заряда  $+q$  по замкнутому пути. На малых участках этого пути работа определяется скалярным произведением электрической силы (вектор которой на малых участках можно считать постоянным) и перемещения на этом участке. Поскольку электрическая сила направлена по радиусу, в скалярное произведение дает вклад только радиальная составляющая перемещения. Поэтому, вычисляя работу для малого перемещения, мы можем представить это перемещение как последовательность перемещений по окружности и по радиусу (рис. П.12).

Электрическая сила будет совершать работу только при перемещении вдоль радиуса и мы сейчас

посчитаем работу при таком малом радиальном перемещении.

Рассмотрим малое перемещение из точки  $A$  в точку  $a_1$ , так что расстояние от точечного заряда до перемещаемого пробного заряда изменится на малую величину  $a = r_{a_1} - r_A$ , где  $r_A$  — расстояние до точки  $A$ , а  $r_{a_1}$  — до точки  $a_1$ . При малом радиальном перемещении от  $A$  до  $a_1$  силу, действующую на пробный заряд,

можно считать постоянной и равной некоторой силе, действующей на этом перемещении.

Как определить среднюю силу? Можно взять среднее арифметическое сил, действующих на расстоянии  $r_A$  и на расстоянии  $r_{a_1}$ :

$$F_a = \frac{1}{2} \left( \frac{Qq}{r_A^2} + \frac{Qq}{r_{a_1}^2} \right),$$

а можно — среднее геометрическое этих величин

$$F_r = \sqrt{\frac{Qq}{r_A^2} \cdot \frac{Qq}{r_{a_1}^2}} = \frac{Qq}{r_A r_{a_1}}.$$

Рис. П.12. Малое перемещение  $\mathbf{r}$  пробного заряда в окрестности точечного заряда складывается из перемещения по окружности  $\mathbf{r}_0$  и перемещения по радиусу  $\mathbf{r}_p$ , т. е.  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_p$

Оказывается, как бы мы ни определяли среднюю силу, при  $a = r_{a_1} - r_A \ll r_A$  (или  $r_{a_1}$ ) ответ будет одним и тем же. Чтобы в этом убедиться, можно использовать свойство малых величин: если  $x$  мало, т. е.  $x \ll 1$ , то

$$\frac{1}{1+x} \approx 1-x \text{ и } \frac{1}{(1+x)^2} \approx 1-2x.$$

**Задание.** Используя эти приближенные соотношения, покажите, что

$$F \approx F_a \approx F_r \approx \frac{Qq}{r_A^2} - \frac{Qq}{r_A^3} a.$$

Работа при рассматриваемом радиальном перемещении составит

$$A = F \cdot a.$$

Мы выберем выражение для средней силы как среднее геометрическое  $F = \frac{Qq}{r_A r_{a_1}}$  и используем соотноше-

ние  $\frac{a}{r_A r_{a_1}} = \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_{a_1}}$ , тогда выражение для работы примет вид

$$A_1 = Fa = \frac{Qq}{r_A r_{a_1}} a = Qq \frac{a}{r_A r_{a_1}} = Qq \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_{a_1}} \right) = \frac{Qq}{r_A} - \frac{Qq}{r_{a_1}}.$$

Точно так же вычисляется работа при малом перемещении из  $a_1$  в  $a_2$ . Эта работа составит

$$A_2 = \frac{Qq}{r_{a_1}} - \frac{Qq}{r_{a_2}}.$$

Точно такое же выражение с заменой  $r_{a_1}$  на  $r_{a_2}$  и  $r_{a_2}$  на  $r_{a_3}$  мы получим для работы при перемещении из  $a_2$  в  $a_3$  и так далее вплоть до последнего малого перемещения из точки  $a_n$  в точку  $B$ , при котором работа электрической силы составит

$$A_n = \frac{Qq}{r_{a_n}} - \frac{Qq}{r_B}.$$

Полная работа при перемещении пробного заряда из точки  $A$  в точку  $B$  по пути  $a$  складывается из сумм работ на всех малых перемещениях и составляет

$$A = A_1 + A_2 + \dots + A_n = \frac{Qq}{r_A} - \frac{Qq}{r_{a_1}} + \frac{Qq}{r_{a_1}} - \frac{Qq}{r_{a_2}} + \dots + \frac{Qq}{r_{a_n}} - \frac{Qq}{r_B} = \frac{Qq}{r_A} - \frac{Qq}{r_B}.$$

Итак, работа при перемещении пробного заряда из точки  $A$  в точку  $B$  зависит только от величины пробного заряда  $q$ , величины данного точечного заряда  $Q$  и от расстояний  $r_A$  и  $r_B$  до начальной  $A$  и конечной  $B$  точек перемещения.

Если мы повторим для перемещения из  $A$  в  $B$  по пути  $b$  все рассуждения, проведенные для пути  $a$ , мы получим тот же самый ответ. Получается, что работа электрической силы при перемещении пробного заряда вблизи точечного заряда не зависит от пути, по которому происходит перемещение. Это замечательное свойство электрической силы можно обобщить для любого перемещения вблизи заряженного тела любой формы, вблизи любой системы заряженных тел.

А сейчас мы установим одно интересное следствие независимости работы электрической силы от формы

пути, по которому происходит перемещение пробного заряда.

Пусть мы сначала переместим пробный заряд из точки  $A$  в точку  $B$  по какому-то пути  $a$ , а потом переместим этот заряд обратно из точки  $B$  в точку  $A$  по другому пути  $b$ . Какую работу совершит электрическая сила в этом случае?

Если при перемещении пробного заряда из точки  $A$  в точку  $B$  по пути  $a$  электрическая сила совершает работу  $A$ , то, как мы только что установили, точно такую же работу она совершила бы над пробным зарядом при его перемещении из  $A$  в  $B$  по пути  $b$ . Но нас-то интересует работа, совершаемая при перемещении по пути  $b$  в обратном направлении — из  $B$  в  $A$ . Складывая именно эту работу с работой  $A$  по пути  $a$ , мы получим искомую работу по замкнутому пути. При этом заряд перемещается по пути  $b$  в обратном направлении, так что величины работы на каждом малом перемещении меняют знак. Вычисляя сумму работ на таких малых перемещениях, мы получим ту же величину, что и раньше, при расчете работы по пути  $b$ , но с противоположным знаком. Складывая сумму работ по пути  $a$  и полученную с обратным знаком работу по пути  $b$ , мы получим

$$A_a - A_b = 0.$$

Итак, работа электростатической силы при перемещении пробного заряда по замкнутому контуру равна нулю. Этот вывод, как легко показать, справедлив для любой силы, вызываемой системой неподвижных электрических зарядов.

Теперь рассмотрим более общий случай силы произвольной природы.

### Непотенциальное вихревое поле

Пусть задано некоторое силовое поле  $\mathbf{F}$ , т. е. определена сила, действующая в каждой точке пространства на пробное тело.

Будем перемещать пробное тело по очень малому замкнутому контуру и выясним, каким условиям должно удовлетворять поле  $\mathbf{F}$ , чтобы работа, совершаемая при перемещении пробного тела по этому контуру, была равна нулю.

Подсчитаем работу по перемещению пробного тела по малому прямоугольному замкнутому контуру, изо-



бражейному на рис. П.13. Для простоты мы полагаем, что контур лежит в плоскости, перпендикулярной оси  $Z$ , и представляет собой последовательность показанных на рисунке малых перемещений, параллельных осям  $X$  и  $Y$ . Полная работа силы есть сумма работ, совершаемых при каждом перемещении. Предполагая перемещение малым, мы можем считать, что величина силы при каждом малом перемещении не меняется.

При первом перемещении 1 на расстояние  $\Delta y$  вдоль оси  $Y$  работу совершает только составляющая силы вдоль этой оси  $F_y(1)$  и эта работа равна  $F_y(1) \cdot \Delta y$ . При втором перемещении 2 на расстояние  $\Delta x$  вдоль оси  $X$  вклад в эту работу дает только составляющая силы  $F_x(2)$  по оси  $X$ : величина работы при втором перемещении составляет  $F_x(2) \cdot \Delta x$ . Третье перемещение 3 так же, как и первое перемещение, происходит на расстоянии  $\Delta y$  по линии, параллельной оси  $Y$ , и работу на этом перемещении тоже совершает только составляющая силы вдоль оси  $Y$ :  $F_y(3)$ , но теперь перемещение происходит в направлении, противоположном направлению оси  $Y$ , поэтому величина работы на этом перемещении имеет отрицательный знак:  $-F_y(3) \cdot \Delta y$ . Аналогично, и четвертое перемещение 4 похоже на второе перемещение, оно происходит на то же расстояние  $\Delta x$  по линии, параллельной оси  $X$ , и работу на нем совершает только  $F_x(4)$  — составляющая силы вдоль оси  $X$ : но перемещение происходит в направлении, противоположном направлению оси  $X$ , так что и здесь работа имеет отрицательный знак:  $-F_x(4) \cdot \Delta x$ .

Полная работа, совершаемая силой при перемещении по рассматриваемому контуру, составляет

$$A = F_y(1) \Delta y + F_x(2) \Delta x - F_y(3) \Delta y - F_x(4) \Delta x = \\ = [F_x(2) - F_x(4)] \Delta x - [F_y(3) - F_y(1)] \Delta y$$

Определим теперь заключенные в квадратные скобки разности проекций силы. Рассмотрим разность  $F_y(3) - F_y(1)$ . Это разность между значениями проек-

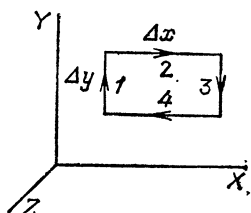


Рис. П.13. Замкнутый прямоугольный контур в плоскости  $XY$

ции силы на ось  $Y$  при третьем и первом перемещении. Соответствующие этим перемещениям участки контура представляют собой малые отрезки с одинаковыми координатами на оси  $Y$ , смещенные друг относительно друга на малое расстояние  $\Delta x$  вдоль оси  $X$ . Если мы будем стягивать контур вдоль оси  $X$ , приближая отрезок 3 к отрезку 1, так что расстояние между ними будет стремиться к нулю, то в пределе бесконечно малого  $\Delta x$  предел отношения разности  $F_y(3) - F_y(1)$  к  $\Delta x$  определит частную производную составляющей  $F_y(x, y, z)$  по  $x$  при постоянных  $y$  и  $z$ . Тогда для очень малых  $\Delta x$  рассматриваемая разность равна произведению  $\Delta x$  и частной производной

$$\left. \frac{\partial F_y}{\partial x} \right|_{y, z} = F_{y, x}$$

$$F_y(3) - F_y(1) \approx F_{y, x} \Delta x.$$

Рассуждая подобным же образом, найдем, что разность значений проекции силы на ось  $X$  на отрезках, отвечающих второму и четвертому перемещению,  $F_x(2) - F_x(4)$  при малых  $\Delta y$  можно представить как произведение  $\Delta y$  и частной производной функции  $F_x(x, y, z)$  по  $y$  при постоянных  $x$  и  $z$ :

$$F_x(2) - F_x(4) \approx F_{x, y} \Delta y.$$

Итак, работа силы  $F$  при перемещении пробного тела по рассматриваемому замкнутому контуру равна  $A = (F_{x, y} \Delta y) \Delta x - (F_{y, x} \Delta x) \Delta y = F_{x, y} \Delta y \cdot \Delta x -$

$$- F_{y, x} \Delta x \cdot \Delta y = (F_{x, y} - F_{y, x}) \Delta x \cdot \Delta y.$$

Теперь заметим, что площадь  $\Delta S$  внутри рассматриваемого прямоугольного контура как раз составляет  $\Delta x \cdot \Delta y$ . Окончательно получаем

$$A = (F_{x, y} - F_{y, x}) \Delta S. \quad (**)$$

Можно убедиться в том, что в действительности это соотношение справедливо не только для прямоугольного, но и вообще для любого малого плоского контура, расположенного в плоскости осей  $X$  и  $Y$ .

Разобьем такой контур  $\Gamma$  на малые прямоугольные контуры (рис. П.14). Выберем определенное направление обхода каждого контура. Тогда в двух соседних прямоугольных контурах перемещение по смежным сторонам будет происходить в противоположные стороны (рис. П.14), поэтому и вклады в работу по перемещению вдоль таких сторон в обоих контурах бу-

дут равными по величине и противоположными по знаку. Если мы посчитаем работу по перемещению пробного тела по каждому прямоугольному контуру, то для каждого контура мы можем записать соотношение (\*\*). Сложив работу по перемещению тела по всем контурам, мы получим, что вклады в работу от всех линий, находящихся внутри рассматриваемого контура  $\Gamma$ , взаимно уничтожаются, поскольку все они являются смежными для соседних внутренних контуров. Поэтому работа по обходу по всем прямоугольным контурам совпадает с работой по внешнему контуру  $\Gamma$ . С другой стороны, суммарная работа есть сумма произведений площадей прямоугольных контуров и соответствующих величин  $F_{x,y} - F_{y,x}$  внутри этих контуров. Получается, что работа по контуру  $\Gamma$  равна

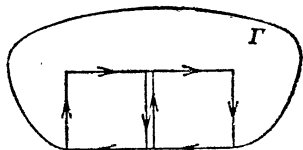


Рис. П.14. Работы по общим сторонам малых контуров компенсируются

$$A = [F_{x,y} - F_{y,x}] \Delta S_1 + [F_{x,y} - F_{y,x}] \Delta S_2 + \dots$$

Мы выбрали контур  $\Gamma$  малым, так что можно пренебречь изменением величины  $[F_{x,y} - F_{y,x}]$  внутри этого контура. Значит, можно считать эту величину во всех прямоугольных контурах одной и той же, так что работа силы по перемещению пробного тела вдоль контура  $\Gamma$  есть

$$A_\Gamma = [F_{x,y} - F_{y,x}] (\Delta S_1 + \Delta S_2 + \dots).$$

Сумма площадей всех прямоугольных контуров, на которые мы разбили контур  $\Gamma$ , равна полной площади, заключенной внутри этого контура. Таким образом, соотношение (\*\*) оказывается справедливым для малого плоского контура любой формы.

Мы рассматривали контуры в плоскости осей  $X$  и  $Y$ . Мы можем повторить наши рассуждения для малых плоских контуров в плоскости осей  $X$  и  $Z$ . Работа силы по перемещению пробного тела вдоль таких малых плоских контуров выразится через частные производные по  $x$  и  $z$  от составляющих силы по осям  $Z$  и  $X$ :

$$A = [F_{z,x} - F_{x,z}] \Delta S.$$

Аналогично, для малых плоских контуров, лежащих в плоскости осей  $Y$  и  $Z$ , соотношение будет иметь вид

$$A = [F_{y,z} - F_{z,y}] \Delta S.$$

Итак, отнюдь не всегда работа силы по замкнутому контуру равна нулю. Неоднородности силового поля в окрестности каждой точки пространства должны удовлетворять определенным условиям для того, чтобы работа по перемещению тела по любому контуру в окрестности любой точки пространства была равна нулю. Эти условия связывают частные производные различных компонент вектора силы по различным направлениям. Только в случае, если в любой точке пространства выполнены соотношения

$$F_{x,y} = F_{y,x}, \quad F_{z,x} = F_{x,z}, \quad F_{y,z} = F_{z,y}, \quad (***)$$

работа по любому замкнутому контуру будет равна нулю. Если работа по любому замкнутому контуру равна нулю, то и работа по перемещению пробного тела из одной точки в другую не будет зависеть от формы пути. Вычисляя работу по перемещению пробного тела из одной точки в другую, мы будем получать один и тот же ответ для любого пути, по которому мы совершаем перемещение. Фиксируя некоторую точку, мы можем определить работу силы по перемещению пробного тела из этой точки в любую другую точку пространства. Тем самым мы свяжем с каждой точкой пространства скалярную величину, равную величине работы по перемещению пробного тела из фиксированной точки в данную точку. Эту величину мы можем назвать *потенциалом* рассматриваемого *векторного поля*.

Таким образом, для векторного поля, удовлетворяющего условиям (\*\*\*), может быть определен его *скалярный потенциал*  $\phi$ . Такое векторное поле называется *потенциальным полем*. Выше, на примере скалярного электрического потенциала мы установили связь между потенциалом и векторным полем его градиента. Эта связь между потенциальным векторным полем и скалярным полем его потенциала имеет вид

$$\mathbf{F} = \text{grad } \phi.$$

В декартовой системе координат это соотношение устанавливает связь между каждой компонентой век-

тора силы  $\mathbf{F}$  и соответствующей компонентой вектора градиента потенциала, равной частной производной потенциала по соответствующей координате

$$F_x = \varphi_{,x}, \quad F_y = \varphi_{,y}, \quad F_z = \varphi_{,z}.$$

Подставим эти выражения для компонент силового поля в соотношения (\*\*\*). Тогда эти соотношения превратятся в соотношения для пространственных производных потенциала. Например, первое соотношение в (\*\*\*), будет иметь вид

$$(\varphi_{,x})_{,y} = (\varphi_{,y})_{,x}.$$

В левой части этого равенства надо сначала взять частную производную потенциала  $\varphi$  по  $x$  при постоянных  $y$  и  $z$ , а потом эту частную производную продифференцировать по  $y$  при постоянных  $x$  и  $z$ . В правой части равенства последовательность дифференцирования обратная: сначала надо взять производную по  $y$  при постоянных  $x$  и  $z$ , а потом продифференцировать эту производную по  $x$ , считая  $y$  и  $z$  постоянными. Можно показать, что при любой последовательности дифференцирования ответ будет один и тот же.

Таким образом, можно непосредственной проверкой убедиться в том, что в потенциальном поле соотношения (\*\*\*), справедливы.

### Циркуляция

В общем случае можно рассмотреть поле векторной величины, не обязательно имеющей физический смысл силы. В этом общем случае сумма скалярных произведений векторной величины и малых перемещений по замкнутому контуру — величина, аналогичная работе силы по перемещению пробного тела по замкнутому контуру, — называется *циркуляцией* рассматриваемой векторной величины. Это название сразу напоминает о циркуляции воды в водоворотах. Формально, условие того, что циркуляция векторной величины по любому замкнутому контуру равна нулю, записывается также в виде соотношений (\*\*\*). Если эти соотношения выполнены на контуре и внутри него, то с рассматриваемым полем векторной величины связан скалярный потенциал, так что эта величина является градиентом ее потенциала и ее поле — потенциальное (см. выше).

А что будет, если циркуляция не равна нулю? Если соотношения (\*\*\*) не выполняются?

При ненулевой циркуляции векторной величины мы уже не можем связать с ней скалярное поле ее потенциала. Например, если работа по замкнутому контуру — частный случай циркуляции — не равна нулю, то, вычисляя работу по перемещению пробного тела из одной точки в другую, мы будем получать разную величину для разных путей, по которым происходит перемещение. В каждой точке пространства уже нельзя определить скалярную величину работы по перемещению в эту точку пробного тела из некоторой фиксированной точки. Эта скалярная величина будет неопределенной — она будет зависеть от формы пути перемещения. Поле векторной величины с ненулевой циркуляцией по замкнутому контуру называют *непотенциальным полем*.

Из-за ненулевой циркуляции по замкнутому контуру с векторным непотенциальным полем нельзя связать скалярный потенциал. Но именно поэтому с векторным непотенциальным полем можно связать новое векторное поле, характеризующее циркуляцию рассматриваемой векторной величины по замкнутому контуру в окрестности каждой точки.

В самом деле, условия (\*\*\*) потенциальности поля отвечают тому, что в каждой точке пространства равна нулю тройка чисел, тройка значений в этой точке разностей частных производных:

$$F_{y,x} - F_{x,y} = 0, \quad F_{z,y} - F_{y,z} = 0, \quad F_{x,z} - F_{z,x} = 0.$$

Эти соотношения отвечают отсутствию циркуляции по произвольным малым замкнутым контурам, лежащим в плоскостях осей координат, соответственно  $XU$ ,  $YZ$ ,  $XZ$ . Рассмотрим эти соотношения с несколько иной точки зрения.

### Ротор векторного поля

Циркуляция подобна вращению. Пользуясь этой аналогией, мы можем определить вектор, характеризующий циркуляцию в плоскости  $XU$ . Абсолютная величина этого вектора дается выражением  $(F_{y,x} - F_{x,y})$ , а направление определяется поступательным движением «правого» винта при вращении головки винта в направлении циркуляции. Условимся

работать в правой системе координат. Тогда характеризующий циркуляцию вектор будет при выбранном нами направлении циркуляции (рис. П.15) направлен вдоль оси  $Z$ . Мы получили вектор, не зависящий от выбора конкретного контура в плоскости  $XY$ , равный по абсолютной величине

$$F_{y,x} - F_{x,y} \quad (1)$$

и направленный по оси  $Z$ .

Точно так же можно установить, что отношение циркуляции по замкнутому контуру в плоскости  $YZ$  к площади, заключенной внутри этого контура, не зависит от выбора конкретного контура и представляет собой абсолютную величину

$$F_{z,y} - F_{y,z} \quad (2)$$

вектора, направленного вдоль оси  $X$ , а отношение циркуляции по замкнутому контуру в плоскости  $XZ$  к площади, заключенной внутри такого контура, определяет не зависящую от выбора контура абсолютную величину

$$F_{x,z} - F_{z,x} \quad (3)$$

вектора, направленного вдоль оси  $Y$ .

Мы получили три величины, направленные вдоль осей координат. Эти величины представляют собой составляющие вектора, характеризующего циркуляцию рассматриваемой векторной величины. Вектор с компонентами (1), (2) и (3) называется *ротором* или *вихрем* векторного поля  $F$ . Поле, у которого компоненты вихря (1), (2) и (3) отличны от нуля, называется *вихрем*. Потенциальное поле является безвихревым. Ротор векторного поля  $F$  обозначается  $\text{rot } F$ .

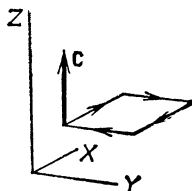


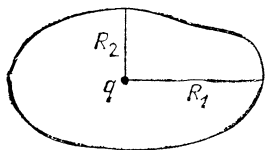
Рис. П.15. Направление вектора циркуляции определяется направлением обхода замкнутого контура

## Закон Гаусса

Мысленно окружим точечный заряд  $+q$  сферой радиуса  $r$  и определим силу, с которой действовал бы наш заряд на малый (пробный) положительный заряд  $+e$ , помещенный в какую-то точку на этой сфере. По закону Кулона получим

$$F = \frac{q^2}{r^2}.$$

Теперь, взяв отношение этой величины к величине  $e$ , мы получим силу, действующую по направлению от заряда  $+q$  к пробному единичному заряду. По определению эта сила и есть напряженность электрического поля. В каждой точке сферы напряженность направлена по радиусу наружу. Если мы изобразим напряженность на сфере стрелками, указывающими направление напряженности, то наша сфера станет похожа на свернувшегося ежа. При этом длина стрелок — абсолютная величина напряженности — в каждой точке сферы одна и та же:  $E = q/r^2$ . А теперь помножим абсолютную величину напряженности на сфере на площадь этой сферы  $S = 4\pi r^2$ :



$$E \cdot S = \frac{q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = 4\pi q.$$

Рис. П.16. Напряженность поля точечного заряда на разных расстояниях разная

Мы подсчитали величину, которая называется *потокотом напряженности электрического поля* через заданную поверхность (нашу сферу).

Эта величина определяется только зарядом, расположенным внутри сферы. Она не зависит от радиуса сферы. Выберем сферу другого радиуса  $R$ . Поток будет тем же самым. Пропорциональное квадрату радиуса сферы изменение площади сферы компенсируется пропорциональным обратному квадрату радиуса изменением напряженности. Поток напряженности остается тем же самым, потому что напряженность (электрическая сила) пропорциональна обратному квадрату расстояния. При любой другой зависимости напряженности (электрической силы) от расстояния поток не был бы постоянным и зависел бы от радиуса сферы.

Наш результат не зависит от формы окружающей точечный заряд поверхности, т. е. справедлив и в том случае, когда эта поверхность не сфера. В этом легко убедиться.

Окружим наш заряд некоторой поверхностью (рис. П.16). На этой поверхности напряженность меняется не только по направлению, но и по абсолютной величине. Одни ее части расположены ближе, другие дальше от заряда, соответственно по закону обратного



квадрата расстояния меняется и величина напряженности.

Есть и другое отличие от случая сферической поверхности. Если разбить сферу на очень маленькие площадочки, на которых направление напряженности практически не меняется и которые можно рассматривать как плоские, то на таких площадочках напряженность будет направлена по нормали (перпендикулярно) плоскости площадочки. У произвольной по-

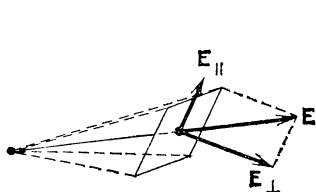


Рис. П.17. Вклад в поток электрической напряженности дает только нормальная  $E_{\perp}$  составляющая вектора напряженности  $E$ . Тангенциальная составляющая  $E_{\parallel}$  вклада в поток не дает

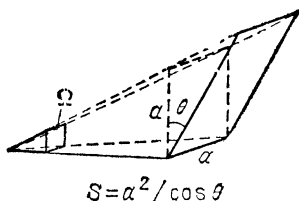


Рис. П.18. Площадь наклонной площадки составляет  $S = a \cdot a / \cos \theta = a^2 / \cos \theta$

верхности напряженность электрического поля на таких маленьких плоских площадочках уже не будет, вообще говоря, направлена по нормали к поверхности. Она может быть направлена под некоторым углом к поверхности, составляя некоторый угол  $\theta$  с нормалью.

В этом случае, чтобы подсчитать поток напряженности через всю поверхность, надо определить поток через каждую площадочку и взять сумму по всем площадочкам.

Подсчитаем поток через отдельную площадочку. В случае сферы площадочки располагались перпендикулярно направлению напряженности электрического поля, и мы просто перемножили бы площадь площадочки и величину напряженности. В случае же площадок, расположенных под углом к направлению напряженности, вектор напряженности можно разложить на две его составляющие (рис. П.17). Одна составляющая направлена по нормали к площадочке, другая лежит в плоскости площадочки. Вклад в поток дает только составляющая, направленная по нормали к площадочке, и поток определяется уже

абсолютной величиной проекции напряженности на нормаль (рис. П.17).

Мы разбили поверхность на маленькие площадочки, на которых можно пренебречь изменением напряженности, равной  $E = q/r^2$ , где  $r$  — расстояние от площадочки до точечного заряда  $q$ . Проекция вектора напряженности на нормаль к площадочке равна

$$E_n = E \cos \theta = \frac{q}{r^2} \cos \theta.$$

А какова площадь площадочки? Сравним ее с площадью квадратной площадочки  $\Delta S = a^2$ , выделяемой на сфере радиуса  $r$  (рис. П.18).

Наша наклонная прямоугольная площадка имеет то же основание  $a$ , что и площадка на сфере, а вот высота ее есть  $a/\cos \theta$ , так что ее площадь составляет  $\Delta S_n = a \frac{a}{\cos \theta} = \frac{a^2}{\cos \theta} = \frac{\Delta S}{\cos \theta}$ . Площадь  $\Delta S_n$  выделяет на сфере радиуса  $r$  телесный угол  $\Delta \Omega = \frac{\Delta S}{r^2}$ .

Подсчитаем поток через наклонную площадку:

$$\text{поток} = E_n \Delta S_n = \frac{q}{r^2} \cos \theta \frac{\Delta S}{\cos \theta} = q \frac{\Delta S}{r^2} = q \Delta \Omega.$$

Из-за закона обратного квадрата расстояния поток через наклонную площадочку оказался независимым ни от угла ее наклона, ни от расстояния от заряда. Суммируя потоки через все площадочки, мы получим:

$$\begin{aligned} \text{полный поток} &= \text{поток через 1-ю площадочку} + \\ &+ \text{поток через 2-ю площадочку} + \\ &+ \text{поток через 3-ю площадочку} + \dots = \\ &= q \Delta \Omega_1 + q \Delta \Omega_2 + q \Delta \Omega_3 + \dots = \\ &= q (\Delta \Omega_1 + \Delta \Omega_2 + \Delta \Omega_3 + \dots) = q \cdot 4\pi, \end{aligned}$$

поскольку для замкнутой поверхности полный телесный угол составляет  $4\pi$ .

Итак, независимо от размеров и формы окружающей точечный заряд замкнутой поверхности полный поток через нее равен  $4\pi q$ .

Мы рассмотрели поток напряженности электрического поля точечного заряда, но принцип суперпозиции (наложения) электрических сил позволяет получить ответ для заряженного тела любой формы и размера.

Действительно, выберем замкнутую поверхность, окружающую тело. Разобьем его на кусочки, которые можно рассматривать как точечные заряды. Напряженность в каждой точке поверхности складывается из напряженностей, определяемых каждым таким кусочком. Соответственно, полный поток складывается из полных потоков напряженности каждого кусочка заряженного тела. Но для таких потоков от отдельных маленьких кусочков мы уже доказали, что поток напряженности электрического поля есть  $4\pi \cdot$  (заряд кусочка). Тогда

$$\begin{aligned}\text{Полный поток} &= \text{сумме потоков от всех кусочков} = \\ &= 4\pi \cdot (\text{сумма зарядов всех кусочков}) = \\ &= 4\pi \cdot (\text{полный заряд тела}).\end{aligned}$$

Мы получили замечательный закон:

*Поток напряженности электрического поля через произвольную поверхность, окружающую заряженное тело, равен заряду тела, помноженному на  $4\pi$ .*

Этот закон — закон Гаусса — в симметричных случаях позволяет значительно проще, чем в прямых расчетах по закону Кулона, вычислять напряженность электрического поля. Мы сейчас убедимся в этом на примере задачи о напряженности поля заряженной сферы.

### **Напряженность электрического поля заряженной сферы**

Окружим заряженную сферу сферической поверхностью большего радиуса  $R$ . По закону Гаусса поток напряженности через эту поверхность есть  $4\pi \cdot$  (заряд сферы). Но из симметрии рассматриваемой задачи следует, что абсолютная величина напряженности в каждой точке поверхности одна и та же, а направлена электрическая напряженность вдоль радиуса. В этом легко убедиться, рассмотрев вклад в напряженность в данной точке поверхности от двух кусочков заряженной сферы, расположенных симметрично относительно радиуса (рис. П.19). Этот вклад, по правилу сложения векторов, оказывается направленным вдоль радиуса. Полная напряженность в данной точке поверхности складывается из вкладов всех таких пар кусочков. Рассматривая другую точку

поверхности, можно также выбрать симметричные уже относительно радиуса к этой точке пары кусочков и суммировать вклад таких пар. Очевидно, что каждой паре кусочков, симметричных относительно радиуса к первой точке, соответствует аналогичная пара кусочков, находящаяся на том же расстоянии до второй точки, так что векторы суммы будут иметь равные абсолютные величины и будут направлены вдоль соответствующих радиусов. Поскольку напряженность в каждой точке поверхности оказывается направленной

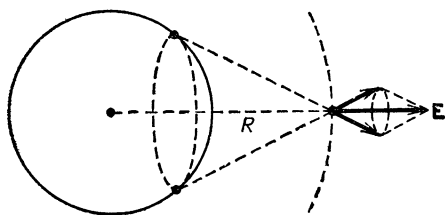


Рис. П.19. Напряженность поля заряженной сферы  $E$  направлена по радиусу. Это следует из симметрии задачи

вдоль радиуса, поток напряженности через рассматриваемую сферическую поверхность определяется точно так же, как и в случае сферической поверхности, окружающей точечный заряд:

$$\text{поток} = E \cdot S,$$

где  $E$  — напряженность, а  $S$  — площадь сферы. Поэтому из закона Гаусса получаем

$$E \cdot 4\pi R^2 = 4\pi Q,$$

где  $Q$  — полный заряд сферы. Для абсолютной величины напряженности имеем

$$E = \frac{Q}{R^2}.$$

Итак, напряженность электрического поля вне однородно заряженной сферы оказывается такой, как если бы заряд сферы был сосредоточен в ее центре. На очень больших расстояниях от сферы этот результат очевиден: на таких расстояниях размерами заряженной сферы можно пренебречь и ее можно рассматривать как точечный заряд. Замечательно, что и на близких расстояниях заряженная сфера действует как точечный заряд, сосредоточенный в ее центре.

Теперь выберем сферическую поверхность, центр которой совпадает с центром сферы, а радиус меньше, чем радиус сферы. Повторяя для такой поверхности *внутри* сферы все только что приведенные рассуждения с симметричными относительно радиуса малыми кусочками сферы, мы получаем, что напряженность электрического поля *внутри* сферы должна бы быть направлена по радиусу и иметь одинаковую абсолютную величину во всех точках рассматриваемой сферической поверхности. Есть только одно отличие: приравняв поток напряженности через эту поверхность заряду *внутри* нее, мы получим, что поток равен нулю — ведь никакого заряда *внутри* нашей поверхности нет — он сосредоточен *вне* ее на заряженной сфере. Площадь нашей поверхности не нулевая, так что равна нулю напряженность.

Итак, напряженность электрического поля внутри заряженной сферы оказалась равной нулю. Отсюда легко понять результаты опытов Франклина. Догадка Пристли была верной — дело тут действительно в законе обратного квадрата расстояния между точечными зарядами. Именно этот закон — закон Кулона — обеспечивает справедливость закона Гаусса \*).

Используя закон Гаусса, можно определить поле заряженной плоскости и плоского конденсатора. Попробуйте проделать это сами.

### Дивергенция электрического поля

Применим теперь закон Гаусса к малой окрестности произвольной точки  $M$  с координатами  $x, y, z$ . Выберем малую область, ограниченную прямоугольным параллелепипедом с ребрами, параллельными осям координат, так что длина ребра, параллельного оси  $X$ , составляет  $\Delta x$ , параллельного оси  $Y$  —  $\Delta y$ , а параллельного оси  $Z$  —  $\Delta z$ .

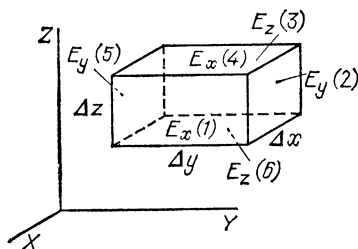
Будем считать грани параллелепипеда настолько малыми, что изменением на них вектора электрической напряженности можно пренебречь. (Мы уже рассматривали такие малые площадочки выше, когда

---

\*) Заметим, что тот же закон обратных квадратов расстояния справедлив и для гравитации. Прекрасным способом проверки этого закона является измерение силы гравитационного притяжения внутри полой массивной сферы. Закону  $1/r^2$  отвечает сила, строго равная нулю.

выводили закон Гаусса, исходя из закона Кулона.) Для рассматриваемой области поток напряженности через окружающую эту область поверхность складывается из шести потоков напряженности через каждую грань (рис. П.20). Каждый такой поток равен произведению проекции напряженности на внешнюю нормаль и площади соответствующей грани.

Складывая потоки через грани, получаем, что закон Гаусса для рассматриваемой области имеет вид



$$\begin{aligned}
 & E_x(1) \Delta y \Delta z - \\
 & - E_x(4) \Delta y \Delta z + \\
 & + E_y(2) \Delta x \Delta z - \\
 & - E_y(5) \Delta x \Delta z + \\
 & + E_z(3) \Delta x \Delta y - \\
 & - E_z(6) \Delta x \Delta y = 4\pi
 \end{aligned}$$

Рис. П.20. Замкнутая поверхность в форме малого прямоугольного параллелепипеда

(полный заряд внутри параллелепипеда).

Поделим левую и правую части этого соотношения на объем рассматриваемой области, равный  $\Delta x \Delta y \Delta z$ . Отношение полного заряда внутри этой области к ее объему представляет собой среднюю по объему плотность заряда  $\rho_{\text{ср}}$ , так что закон Гаусса примет вид

$$\frac{E_x(1) - E_x(4)}{\Delta x} + \frac{E_y(2) - E_y(5)}{\Delta y} + \frac{E_z(3) - E_z(6)}{\Delta z} = 4\pi \rho_{\text{ср}}.$$

Теперь посмотрим, что получится в пределе бесконечно малой области, т. е. в пределе бесконечно малых  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ . Первое слагаемое в левой части последнего соотношения в пределе бесконечно малого  $\Delta x$  совпадает с частной производной составляющей  $E_x$  по  $x$  при постоянных  $y$  и  $z$ , т. е.  $E_{x,x}$ . Второе слагаемое в пределе  $\Delta y \rightarrow 0$  равно частной производной  $E_{y,y}$ , а третье — в пределе  $\Delta z \rightarrow 0$  равно частной производной  $E_{z,z}$ . В пределе бесконечно малого объема средняя плотность заряда приближается к локальной плотности заряда  $\rho$ , характеризующей плотность заряда в рассматриваемой точке  $M$ . Мы получили независимую от выбора малой окрестности точки  $M$  связь между пространственным изменением напряженности электрического поля в произвольной точке  $M$

и плотностью заряда в этой точке:

$$E_{x,x} + E_{y,y} + E_{z,z} = 4\pi\rho.$$

Выражение в левой части представляет собой *дивергенцию* напряженности электрического поля. Закон Гаусса, который мы вывели из закона Кулона, из представления о дальнодействии электрической силы между зарядами, в теории поля привел нас к локальной связи между пространственным изменением электрической напряженности и плотностью электрического заряда:

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho.$$

### Комплексные числа

Всякий раз, когда ставится «неправильный вопрос» (неправильный в рамках данного класса чисел), ответ на него требует расширения числового класса. В классе положительных чисел ответ на вопрос, что будет, если из меньшего числа вычесть большее, невозможен: он приводит к числам отрицательным. В классе целых чисел результат деления на число, не являющееся нормальным делителем делимого, не определен. Мы приходим к числам рациональным, отвечая на вопрос о частном такого деления. Результат извлечения корня квадратного из целого числа, не являющегося полным квадратом, не содержится в классе рациональных чисел — это число иррациональное. Каждый такой «неправильный вопрос» задается правильно. Задается, потому что возникает потребность в ответе на него. Потому что для описания реальности «старых чисел» оказывается недостаточно. Каждый такой «неправильный вопрос» ведет к обобщению понятия числа.

Чтобы что-то измерить, нам нужна линейка. Чтобы измерить что-то очень точно, нужно иметь очень мелкую шкалу деления. Иногда важно знать, что происходит ниже уровня, выбранного нами за нулевой. Если мы возьмем бесконечно длинную линейку с бесконечно мелкими делениями, у которой есть положительные и отрицательные деления, мы можем измерить что угодно, мы можем нанести на нее любую шкалу и отметить точкой — *действительным числом* — результат измерения.

Числа рациональные и иррациональные появились на этой линейке как результат дробления масштаба, числа отрицательные — как результат ее продолжения в оба конца от нуля. Получалась универсальная измерительная ось, годная, казалось бы, на все случаи жизни. Но вот для описания квантовых процессов этой оси уже оказалось недостаточно.

Что будет, если извлечь квадратный корень из отрицательного числа? Что такое  $\sqrt{-1}$ ? В мире действительных чисел это «неправильный вопрос». Ответ на вопрос о корне из  $-1$  выводит нас за пределы действительной числовой оси.

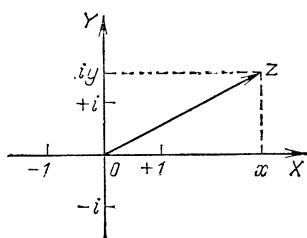


Рис. П.21. Плоскость комплексной переменной  $z$ . Точки вещественной оси  $X$  — вещественные числа; ось  $Y$  — мнимая ось, точки на ней — мнимые числа. Проекции комплексного числа  $z$  на вещественную и мнимую оси определяют величину его действительной и мнимой частей

Величина  $i = \sqrt{-1}$  называется *мнимой единицей*. Это — единица на оси мнимых чисел.

Совокупность чисел действительных и мнимых составляет *числа комплексные*. Комплексное число  $z = x + iy$  есть по сути пара двух действительных чисел: одно —  $x$  называется *действительной частью*  $z$ , а второе  $y$  — его *мнимой частью*. Комплексное число

изображается точкой на комплексной плоскости (рис. П.21). Проекции каждой точки  $z$  этой плоскости на действительную ось  $X$  и мнимую ось  $Y$  (рис. П.21) определяют, соответственно, действительную и мнимую части комплексного числа  $z$ . Единица на оси  $X$  — это обычная единица. Единица на оси  $Y$  — это мнимая единица, это величина  $i = \sqrt{-1}$ . Комплексные числа можно складывать и вычитать — при этом по отдельности складываются и вычитаются действительные и мнимые части. Комплексные числа можно перемножать друг на друга, учитывая правило  $i^2 = -1$ . Например,

$$(x_1 + iy_1)(x_2 + iy_2) = x_1x_2 + iy_1x_2 + ix_1y_2 + i^2y_1y_2 = (x_1x_2 - y_1y_2) + i(y_1x_2 + y_2x_1).$$



Число  $z^* = x - iy$  называется *комплексно сопряженным* числу  $z = x + iy$ . Произведение комплексного числа  $z$  и его комплексно сопряженного  $z^*$  есть число действительное  $zz^* = (x + iy)(x - iy) = x^2 + y^2$ . Его выбирают за «меру абсолютной величины» комплексных чисел. Величину  $|z| = \sqrt{z \cdot z^*} = \sqrt{x^2 + y^2}$  называют *модулем комплексного числа  $z$* . На комплексной плоскости модуль комплексного числа  $z$  есть расстояние от точки, отвечающей числу  $z$ , до начала координат  $O$ . Угол  $\varphi$  между отрезком  $OM$  и действительной осью  $X$  называется *аргументом комплексного числа*.

Комплексное число характеризуется точкой в комплексной плоскости. Можно задать координаты этой точки — ее проекции на действительную и мнимую оси. Тем самым комплексное число задается его действительной и мнимой частью. А можно задать расстояние  $Oz$  и угол  $\varphi$ . Тогда комплексное число  $z$  определяется по его модулю и аргументу. Связь между двумя определениями простая:  $x = |z| \cos \varphi$  и  $y = |z| \sin \varphi$ , так что  $z = x + iy = |z| \cos \varphi + i|z| \sin \varphi = |z|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ . Мы уже объяснили, как перемножаются комплексные числа. А что такое число, возведенное в комплексную степень? Выделив в комплексной степени действительную часть, например,  $e^z = e^{x+iy} = e^x + e^{iy}$ , мы сталкиваемся с выражением  $e^{iy}$ . Что такое мнимая степень  $e^{i\varphi}$ ? В теории комплексных чисел вводится определение мнимой степени  $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$ . Используя это определение\*), комплексное число  $z$  можно записать через его модуль  $|z|$  и аргумент  $\varphi$  как  $z = |z| e^{i\varphi}$ . В такой форме записи произведение двух комплексных чисел  $z_1 = |z_1| e^{i\varphi_1}$  и  $z_2 = |z_2| e^{i\varphi_2}$  дает  $z_1 z_2 = |z_1| |z_2| e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)}$ , т. е. модули перемножаются, а аргументы складываются. Вот, пожалуй, основное, что нам потребуется из науки о комплексных величинах.

---

\*) Это определение можно понять из следующих соображений. При малых  $x \ll 1$  имеем  $e^x \approx 1 + x$  для действительных  $x$ . Если мы предположим, что то же справедливо и для  $e^{i\varphi}$  при малых  $\varphi \ll 1$ , т. е.  $e^{i\varphi} \approx 1 + i\varphi$ , то, учитывая, что  $\cos \varphi \approx 1$  ( $\varphi \ll 1$ ) и  $\sin \varphi \approx \varphi$  ( $\varphi \ll 1$ ), получим  $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$  при  $\varphi \ll 1$ . Обобщая это соотношение на случай не малых  $\varphi$ , получаем указанное определение мнимой степени.

## Уравнения Максвелла

Рассматривая теорию поля (см. Математическое дополнение, с. 213), можно установить, что закон Кулона для силы взаимодействия двух зарядов приводит к закону Гаусса, который связывает полный электрический заряд, заключенный внутри данной поверхности, с потоком силовых линий через эту поверхность. В малой окрестности произвольной точки пространства закон Гаусса сводится к уравнению

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho. \quad (1)$$

Это уравнение является *первым уравнением Максвелла*. Если ограничиться электростатикой и рассматривать только покоящиеся заряды, то электрическое поле (поле электрической напряженности) является безвихревым, так что в окрестности любой точки пространства должно выполняться условие нулевой циркуляции напряженности электрического поля (в общем случае движущихся зарядов — это не так!)

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0. \quad (2)$$

Эти два соотношения полностью описывают всю совокупность электростатических явлений \*).

Перейдем к описанию стационарных (не зависящих от времени) процессов магнитного взаимодействия — *магнитостатике*. Для описания магнитного взаимодействия вводится векторная величина  $\mathbf{H}$  — напряженность магнитного поля, характеризующая магнитное поле. Если бы мы исходили из закона Кулона для «магнитных зарядов», то вектор напряженности  $\mathbf{H}$  можно было бы ввести аналогично вектору напряженности  $\mathbf{E}$  — как силу, действующую на единичный пробный магнитный заряд. Проводя все выкладки, которые привели нас в конечном счете к закону Гаусса и к уравнению Максвелла (1), мы получили бы формально точно такое же уравнение

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 4\pi\rho_m.$$

---

\*) Подчеркнем, однако, что это не все. Не следует думать, что при  $\rho = 0$  имеет место  $\mathbf{E} = 0$  везде. Как мы увидим позже, в нестационарных ситуациях  $\operatorname{rot} \mathbf{E} \neq 0$ , и поэтому в целом вполне возможно  $\rho = 0$ , но  $\mathbf{E} \neq 0$ . Такая ситуация имеет место, например, в радиоволне — но обо всем этом см. ниже,

Но в этом уравнении справа стоит  $\rho_m$  — плотность «магнитного заряда». Ни в каких процессах намагничивания изолированные магнитные полюса не получаются. Разделив магнит, мы получаем все меньшие магнитики, у которых имеются оба магнитных полюса. Таким образом, в случае магнетизма величина в правой части всегда равна нулю. Мы приходим к уравнению Максвелла \*):

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0.$$

Остается описать магнитное воздействие постоянного тока. Магнитное действие тока, текущего по прямому проводу, является отклоняющим. Поэтому поле магнитной напряженности называется *вихревым*. Электрический ток оказывается связанным с циркуляцией магнитной напряженности. Некоторое представление о математическом понятии циркуляции было дано в Математическом дополнении выше, с. 211. В простейшем случае прямого провода магнитное поле тока направлено по кругу

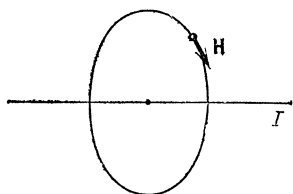


Рис. П.22. Круговое магнитное поле  $\mathbf{H}$  прямого провода с постоянным током  $I$

(рис. П.22). В теории поля циркуляция векторной величины связывается с ее локальной характеристикой — ротором или вихрем рассматриваемой величины (см. Математическое дополнение, с. 212). Поэтому в уравнение будет входить ротор магнитной напряженности  $\operatorname{rot} \mathbf{H}$ .

Как охарактеризовать ток — течение электрического заряда? Течение воды можно описывать количеством воды, протекающей через данное сечение за единицу времени. Точно так же течение электрического заряда можно характеризовать зарядом, протекающим через данное сечение проводника в единицу времени. Локальной характеристикой тока является его *плотность* — ток через единицу площади сечения. Плотность тока от формы сечения проводника не зависит — это локальная векторная характеристика тока. Четвертое уравнение Максвелла связывает ротор

\*) Как и для  $\mathbf{E}$ , из условия  $\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$  не следует  $\mathbf{H} = 0$ , и к этому мы переходим.

вектора магнитной напряженности с вектором плотности электрического тока  $\mathbf{j}$ :

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}.$$

Постоянная  $4\pi$  в этом соотношении связана с используемой нами системой единиц СГСЕ, а множитель  $1/c$ , где  $c$  имеет размерность скорости, вводится из соображений размерности. Итак, имеются всего четыре уравнения, описывающие всю совокупность стационарных (не зависящих от времени) электрических и магнитных явлений.

Теперь перейдем к *нестационарным* процессам. Первое уравнение оказывается справедливым и в этом случае. А вот второе уравнение уже следует изменить. Опыты Фарадея по изучению электромагнитной индукции показали, что изменение магнитного поля со временем вызывает появление тока, циркулирующего в витке провода. Ток, упорядоченное движение зарядов в проводе\*), вызывается электрической силой (напряженностью электрического поля), циркулирующей в проводе. Появление такой напряженности в витке провода вследствие изменения потока напряженности магнитного поля через плоскость витка и составляет явление *электромагнитной индукции*. Переменное магнитное поле — источник циркуляции электрического поля. Поэтому в нестационарном случае второе уравнение уже не справедливо. В нестационарном случае второе уравнение должно описывать явление электромагнитной индукции. Оно должно

---

\*) Течение тока есть нечто промежуточное между стационарной и нестационарной ситуациями. Для наблюдателя один электрон сменяет другой, картина одна и та же. Но индивидуальный электрон движется, он переходит с одного конца провода на другой. Правда, время движения индивидуального электрона велико. При токе в 1 ампер отдельный электрон проходит с одного конца медного провода длиной 1 м и сечением 1 мм до другого конца за сутки. Такова скорость упорядоченного движения электрона. На это движение накладывается тепловое движение, фермиевское движение электронов в металлах. Поэтому, даже если скорость упорядоченного движения  $\langle u \rangle = 0$ , то  $\langle u^2 \rangle \neq 0$  вследствие неупорядоченного движения электронов в веществе. Квантовая механика учит нас, что и при абсолютном нуле температуры, в низшем энергетическом состоянии, электроны движутся, но так, что средний ток равен нулю (существует так называемое фермиевское движение). В металле скорость фермиевского движения соответствует скорости порядка  $10^8$  см/с = 1000 км/с.

связывать циркуляцию напряженности электрического поля (локально — ее ротор) с изменением со временем напряженности магнитного поля (характеристикой такого мгновенного изменения по аналогии с мгновенной скоростью является производная вектора  $\mathbf{H}$  по времени, причем производная — частная, определяемая в данной точке при неизменных пространственных характеристиках). Тем самым в нестационарном случае второе уравнение имеет вид

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}.$$

Знак «минус» означает, что циркуляция электрического поля должна вызывать в витке такое направление тока, при котором магнитное действие этого тока стремится компенсировать начальное изменение магнитного поля. Соображения размерности и в этом случае требуют, чтобы в правой части появился множитель размерности с/см, т. е. обратной скорости. Оказывается, что это именно  $1/c$ , где  $c$  — скорость света! (см. ниже).

В нестационарном случае третье уравнение остается справедливым. Для описания всех известных во времена Максвелла электромагнитных явлений не требовало изменения в нестационарном случае и четвертое уравнение. Но физическая картина, стоящая перед мысленным взором Максвелла, требовала для своего завершения модификации этого уравнения. Исходя из симметрии между электричеством и магнетизмом, Максвелл предположил, что должно существовать новое нестационарное явление, подобное явлению электромагнитной индукции — ток смещения (см. с. 42). С учетом тока смещения четвертое уравнение Максвелла принимает вид

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}.$$

### Электромагнитные волны

Здесь мы обсудим свойства электромагнитных волн как решений уравнений Максвелла.

Чтобы выяснить, что это за решения, обратимся к уравнениям Максвелла для «пустого» пространства, в котором плотность заряда  $\rho$  и плотность тока  $\mathbf{j}$  равны нулю. В «пустом» пространстве при  $\rho = 0$  и  $\mathbf{j} = 0$

уравнения Максвелла имеют вид

$$1) \operatorname{div} \mathbf{E} = 0, \quad 2) \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t},$$

$$3) \operatorname{div} \mathbf{H} = 0, \quad 4) \operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}.$$

Выберем декартову систему координат  $X, Y, Z$  и запишем эти уравнения для векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  как систему дифференциальных уравнений.

Пусть нестационарное электрическое поле имеет только составляющую по оси  $Y$ , а магнитное поле имеет единственную изменяющуюся по времени компоненту — по оси  $Z$ . В этом случае система уравнений упрощается. Остаются только два уравнения

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{1}{c} \frac{\partial H_z}{\partial t}, \quad -\frac{\partial H_z}{\partial x} = \frac{1}{c} \frac{\partial E_y}{\partial t}$$

и легко проверить, что если  $E_y = H_z = f(x - ct)$ , где  $f$  — произвольная функция, то эти уравнения обратятся в тождества. Значит, мы угадали решение уравнения Максвелла в пустоте:

$$E_y = H_z = f(x - ct).$$

В этом решении векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  перпендикулярны друг другу. При этом пространственное изменение одного поля приводит к изменению во времени другого. Во времени и пространстве разыгрывается процесс непрерывного взаимопревращения электрического и магнитного полей.

Посмотрим, как изменяется каждое из полей в этом процессе. Пусть в момент  $t = 0$  мы имели некоторое распределение  $E_y(x)$  и  $H_z(x)$  по  $X$  (рис. П.23). Тогда через время  $t$  заданный в начальный момент профиль  $E_y(x)$  и  $H_z(x)$  сместится на расстояние  $ct$  в сторону положительного направления оси  $X$ . За равные промежутки времени заданный в начальный момент времени профиль смещается на равные расстояния. Постоянная скорость такого смещения  $c$ .

Таким образом, решение  $f(x - ct)$  описывает распространение электромагнитного поля в сторону положительного направления оси  $X$ . Полученное решение описывает волну, распространяющуюся в положительном направлении вдоль оси  $X$ .

Итак, уравнения Максвелла в пустоте сводятся к волновому уравнению. Они имеют решения, описываю-

щие электромагнитные волны, распространяющиеся со скоростью  $c$ . Этот коэффициент с размерностью скорости мы ввели в уравнения Максвелла из соображений размерности. Он определяется из опытов Фарадея и Ампера. Уравнения Максвелла в пустоте вскрывают глубокий физический смысл этого коэффициента — он равен скорости распространения электромагнитных волн.

Мы рассмотрели довольно частный случай.

Но физика процесса не зависит от того, как мы выбираем систему координат, или от того, как мы ориентируем их оси. Поэтому из нашего частного решения мы можем вывести много других решений уравнений Максвелла. Эти решения получаются при всевозможных преобразованиях системы координат — при ее поворотах вокруг любой прямой или при смене направлений осей. Уравнения Максвелла линейны по полям  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ . Если  $\mathbf{E}_1$ ,  $\mathbf{H}_1$ ;  $\mathbf{E}_2$ ,  $\mathbf{H}_2$  являются решениями этих уравнений, то их суперпозиция также будет решением уравнений Максвелла. Совершая преобразования координат и используя принцип суперпозиции, мы можем получить из нашего решения все решения уравнений Максвелла в пустоте\*).

Эти решения отвечают совокупности всех волн, которые могут распространяться в любом направлении в пространстве. Скорость распространения каждой волны равна  $c$ . В каждой волне вектор  $\mathbf{E}$  направлен перпендикулярно вектору  $\mathbf{H}$ . В каждой волне векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, ориентированы поперек направления движения. Электромагнитные волны являются *поперечными* (поперечно поляризованными).

В этом их принципиальное отличие от волн акустических, в которых вектор смещения (рис. П.24) на-

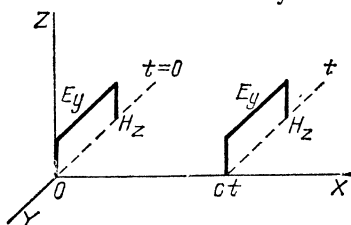


Рис. П.23. Распространение электромагнитного сигнала в направлении оси  $X$ :  $E_y(x, t) = E_y(x - ct)$ ;  $H_z(x, t) = H_z(x - ct)$

\*) Обратим особое внимание на произвол выбора функции  $f(x - ct)$ . Функция  $f$  может быть периодической или суммой гармонических функций. Все эти функции описывают различные решения уравнения Максвелла,

правлен по направлению волны. Акустические волны — продольные. Электромагнитные волны в пустоте не могут быть продольными. В самом деле,  $E_x = H_x = f(x - ct)$  не может быть решением, потому что в

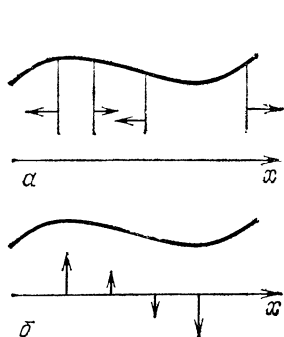


Рис. П.24. Акустическая волна (а) — продольная, ее распространение обусловлено смещениями в направлении распространения волны  $x$ . Электромагнитная волна (б) — поперечная, ее распространение связано с изменениями поля в направлениях, поперечных направлению ее распространения

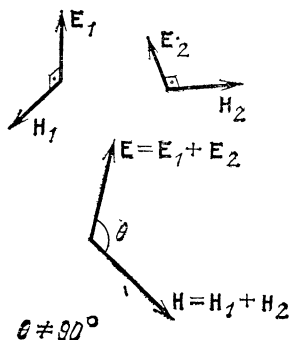


Рис. П.25. При суперпозиции двух волн векторы электрического и магнитного полей могут быть неортогональными: угол между ними может отличаться от  $90^\circ$

этом случае  $\text{div } \mathbf{E} = \text{div } \mathbf{H} = \frac{\partial f}{\partial x} \neq 0$ , что противоречит уравнениям 1) и 3).

Заметим, что для совокупности волн свойства отдельных волн теряются. Так, если в одной волне вектор  $\mathbf{E}_1$  перпендикулярен вектору  $\mathbf{H}_1$ , а в другой волне вектор  $\mathbf{E}_2$  перпендикулярен вектору  $\mathbf{H}_2$ , то в совокупности этих волн вектор напряженности электрического поля  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$  уже не перпендикулярен вектору напряженности магнитного поля  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2$  (рис. П.25). И все же условия  $\rho = 0$ ,  $\mathbf{j} = 0$  отличают произвольную систему волн от статических полей. Но отличие это локально не проявляется — природу поля нельзя определить по его проявлениям в данной точке пространства в данный момент времени. Только выбрав конечный объем и промерив в нем  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  и их производные, мы можем отличить поле волны от поля неподвижного заряда.



Некролог, подписанный руководителями партий, правительства и Академии наук, траурное сообщение в программе «Время», его гроб посреди заполненного до отказа зала в здании Президиума Академии наук, непокрытые, несмотря на 20-градусный мороз, головы на траурном митинге на Новодевичьем кладбище — все это было, но принять связь этих фактов со смертью Якова Борисовича внутренне невозможно. Все равно ждешь его ранних утренних телефонных звонков; проходя мимо ворот Института физических проблем, невольно заглядываешь в окна его кабинета — на месте ли он; безотчетно выглядываешь его в залах заседаний научных семинаров и конференций. Яркое, живое ощущение его присутствия сохраняется. Для всех, кто его знал, слова «смерть» и «Зельдович» грамматически несовместимы.

Он всегда жил наукой, и его жизнь в ней продолжается. Он казался в ней безграничным и всеохватывающим. Лично не знавшие его зарубежные ученые, знакомясь с его фундаментальными работами по химии и теории детонации, ядерной физике и физике элементарных частиц, астрофизике и космологии, приходили к выводу, что Зельдович, как и Н. Бурбаки, — псевдоним целой группы высококвалифицированных ученых. Личные встречи устранили заблуждение, вызывая восхищение разносторонностью его личности. ЧВАН — член всех академий наук — так иногда он аттестовал себя. Он знал о своем гении и величии, но озорство и задор его жизнелюбия снимали монументальность самоощущения. Он не был на «Вы» с собой в науке, он был на «Я» с наукой в себе. В его подходе к решению научных проблем привлекала яркая и целостная картина изучаемого явления, в которой формулы и выкладки казались лишь пояснением и обоснованием интуитивно уже «убеденного» решения. «Ведь он видит это», — такой отзыв о каком-нибудь ученом звучал у него одобрительно и даже с некоторой завистью, если у самого Зельдовича такого «видения» не было. Результаты, не сводимые к ясной физической картине, не объяснимые «на пальцах», от него, по его выражению, «отскакивали». Он не мог принять формально правильных, но физически не осмысленных сухих математических выводов. Такие работы вызывали у него скуку и откровенную зевоту.

Наша совместная научная работа относится к последнему десятилетию его жизни и творчества. Поэтому рассказ о тех сторонах жизни и биографии Якова Борисовича, очевидцем

которых я не был, будут составлять выдержки из «Автобиографического послесловия», к его избранным научным трудам \*).

Яков Борисович Зельдович родился 8 марта 1914 года в доме своего деда в Минске, но с середины года семья постоянно жила в Петрограде. «Хорошо помню первый, еще детский (12 лет) выбор области знаний, разговор с отцом. Для математики нужны исключительные способности, которых я не ощущал. Физика казалась законченной наукой: сказывалось влияние почтенного школьного учителя физики, торжественно читавшего незыблемые законы Ньютона сперва по-латыни, затем на русском. Мятельный дух новой физики еще не проник в среднюю школу в 1926 году. Между тем курс химии изобиловал загадками: что такое валентность? катализ? И химики не скрывали отсутствия фундаментальной теории. Большое впечатление произвела на меня книга Я. И. Френкеля «Строение материи», особенно первая ее часть, посвященная, главным образом, атомистике и кинетической теории газов, определению числа Авогадро и броуновскому движению. Но атомистика, как и термодинамика, в равной степени относится к физике и химии».

Закончив в пятнадцать лет среднюю школу, Зельдович поступил на курсы лаборантов при Ленинградском институте Механобр. «В марте 1931 г. с экскурсией сотрудников Механобра я посетил отдел химической физики Ленинградского физико-технического института. В лаборатории С. З. Рогинского меня заинтересовала кристаллизация нитроглицерина в двух модификациях. Об этом рассказывал Л. А. Сена (Рогинский был за границей)». Серьезные вопросы юноши произвели впечатление. «После дискуссии (в которой ни я, ни Сена еще не знали истину) мне предложили в свободное время работать в лаборатории. Вскоре встал вопрос об официальном переводе. Ко времени зачисления (15 мая 1931 года) отдел превратился в самостоятельный Институт химической физики». Работая в ИХФ, Я. Б. Зельдович получил уникальное фундаментальное высшее образование, и, хотя диплома о высшем образовании у него не было, в 1936 г. по результатам своих работ по адсорбции и катализу он защищает кандидатскую диссертацию. «Благословенные времена, когда ВАК давал разрешение на защиту лицам, не имеющим высшего образования!»

Темой его докторской диссертации, защищенной в конце 1939 года, была теория окисления азота. «Естественным продолжением работы, в которой горение было источником высокой температуры, явилось исследование самого процесса горения». Для Якова Борисовича теория горения всегда оставалась незабываемой первой любовью. И в 70-е и 80-е годы обращение к ней оказывало на Зельдовича буквально физически омолаживающее воздействие.

«В интересе к химии большую роль играло чисто зрительное восприятие ярких цветов и форм, начинающееся с «превращения воды в кровь» при взаимодействии солей железа и роданистого калия, с образования осадков и кристаллизации. За этим следовал интерес к резкости перехода окраски индикатора и далее к резкости фазовых переходов...

Вместе с тем было правильное и естественное чувство, что за случайностью форм и чередованием плавных и резких зави-

---

\*) Зельдович Я. Б. Избранные труды. — М.: Наука, 1984,

симостей кроются общие закономерности. Сегодня они получили название теории катастроф и синергетики.

В 30-х годах, развивая теорию горения, мы, по существу, занимались конкретными примерами этих наук, не зная их названия. Вспомните молюеровского мещанина во дворянстве, в преклонном возрасте узнающего, что он всю жизнь говорил прозой».

Полнокровное развитие науки немыслимо без широких личных научных контактов. «Возвращаясь к своей работе конца 30-х годов, вижу один существенный дефект: недостаточное внимание к пропаганде своих результатов за рубежом. Я хорошо знал иностранные работы, печатал некоторые работы в советских журналах на английском языке. Однако мне и в голову не приходило разослать свои отписки иностранным ученым. Не было и речи о командировке за границу. Виноватое было время, но виноваты в этом были, может быть, в какой-то мере и старшие товарищи, которые должны были больше заботиться о живых связях». Для Я. Б. Зельдовича эта тема была болезненной и горькой. Работы по физике взрыва, сыгравшие важнейшую роль в укреплении нашей обороноспособности, стали барьером на пути его международных связей и долгое время после окончания этих работ, когда он уже многие годы работал над совершенно «мирными» проблемами. Понимание не оборонной, а сугубо бюрократически-перестраховочной природы этих барьеров больно задевало его. Только в самые последние годы жизни вместе с окончанием «периода застоя» для него открылась возможность посетить некоторые научные центры в Европе и Америке. Большинство же зарубежных научных центров, из года в год посылавших ему приглашения с подробным описанием намечаемых почетных мероприятий по его приему, так и не дождались его в гости. Было бы неверно упускать из вида это, возможно, объективно не столь драматическое, но субъективно для него весьма существенное обстоятельство, говоря о работе Зельдовича над атомной проблемой.

«Открытие деления урана и принципиальной возможности цепной реакции деления предопределило судьбу века — и мою. Вскоре эта проблема целиком захватила меня. В очень трудные годы страна ничего не жалела для создания наилучших условий работы. Для меня это были счастливые годы. Большая новая техника создавалась в лучших традициях большой науки. Внимание к новым предложениям и к критике совершенно независимо от чинов и званий авторов, отсутствие утайвания и подозрительности — таков был стиль нашей работы». На своем 70-лети, торжественно отмечавшемся в Институте физических проблем, Яков Борисович выступил с изложением своей биографии в форме научного доклада, проецируя на эпидиаскопе заранее подготовленные «прозрачки». На «прозрачке», относящейся к периоду, принесшему ему три звезды Героя Социалистического Труда, был изображен черный прямоугольник — черный ящик, как наиболее подходящее изображение содержания его деятельности, и одновременно широкой спины Игоря Васильевича Курчатова, заслонявшего возглавляемый им научный коллектив от всех «внешних колебаний общественной жизни».

«Страна переживала трудные послевоенные годы. Однако огромный авторитет Курчатова создавал здоровую атмосферу. Более того, наша работа оказывала благотворное влияние на

советскую физику в целом. Однажды, когда я находился в кабинете Курчатова, раздался телефонный звонок из Москвы: «Так что же, печатать в «Правде» статью философа, опровергающего теорию относительности?» Игорь Васильевич, ни на минуту не задумываясь, ответил: «Тогда можете закрывать все наше дело». Статья не была напечатана.

К середине 50-х годов некоторые первоочередные задачи были уже решены... «Хочу сказать, что работа с Курчатовым и Харитоновым дала мне очень много. Главным было и остается внутреннее ощущение того, что выполнен долг перед страной и народом. Это дало мне определенное моральное право заниматься в последующий период такими вопросами, как частицы и астрономия, без оглядки на практическую ценность их».

«Работа в области теории взрыва психологически подготавливала к исследованию взрывов звезд и самого большого взрыва — Вселенной как целого.

Одновременно производственная работа стимулировала интерес к ядерной физике и физике нейтронов. В 50-е годы отсюда было рукой подать до физики элементарных частиц».

В 1964 году Я. Б. Зельдович официально переходит в Институт прикладной математики, 19 лет его работы в котором стали ярким периодом развития советской теоретической астрофизики и космологии. Эта его деятельность, продолжавшаяся и после его перехода на последнее место работы — Институт физических проблем, вооружила наблюдательную астрономию проницательной силой понимания физических процессов, определяющих структуру и эволюцию звезд, галактик, скоплений, Вселенной в целом. Среди работ в этой области Зельдович выделил развитую под его руководством теорию образования структуры Вселенной. Центральным вопросом этой теории становилась физическая природа основной массы Вселенной, необъяснимая изученными в лабораториях свойствами известных частиц. В поисках кандидатов на роль такой скрытой массы космология вынуждена обращаться к таким предсказаниям теории элементарных частиц, которые не могут быть проверены в экспериментах на ускорителях, но которые определяют нетривиальные физические процессы и явления на очень ранних стадиях эволюции Вселенной.

«Жизнь продолжается, и космология углубляется в область, где физика далеко оторвалась от экспериментальной проверки. Новое поколение теоретиков говорит не о первых трех минутах или секундах, не о ядерных реакциях и плазме. Обсуждаются процессы на планковской длине, за планковское время с планковской энергией... В теории поля рассматриваются 5-, 11- и 26-мерные пространства. В лабораторных условиях они обязательно будут имитировать наше обычное (3+1) пространство-время, лишние измерения спрячутся, свернутся, оставляя следы лишь в систематике частиц и полей. Приходят 20-летние ребята, сразу, без груза предыдущих работ и традиций, берущиеся за новую тематику. Не выгляжу ли я среди них мастодонтом или археоптериксом?»

Меня утешает перестройка психики с возрастом. В настоящее время (за несколько дней до 70-летия) меня уже меньше интересуют соревновательные мотивы, скажу ли именно я то «э-э», из-за которого спорили Добчинский и Бобчинский. Конечно-

ный результат, физическая истина интересует меня почти независимо от того, кто ее найдет первым. Хватило бы мне сил понять ее!

Человечество, как никогда, находится на пороге замечательных открытий. Все ярче выступает идея всеобъединяющей физической теории... Возможно, что именно космология окажется пробным камнем для проверки новых теорий... В середине 80-х годов в тугой узел сплетаются самые трудные и самые принципиальные вопросы естествознания. Нет у меня желания более сильного, чем желание дожидаться ответа и понять его».

В поисках такого ответа вопросы фундаментальной структуры микромира и макромира сливаются в единое целое. И в последние месяцы жизни Я. Б. Зельдович отдает много сил и энергии созданию Научного совета АН СССР по комплексной проблеме «Космология и микрофизика», призванного соединить усилия физиков-экспериментаторов, астрономов, радиоастрономов, космофизиков, астрофизиков, космологов и физиков-теоретиков для решения фундаментальных проблем современного естествознания. Продолжение этой деятельности становится моральным долгом для всех, кого он к ней призвал.

Даже беглое знакомство с основными этапами его научной биографии создает ощущение личности уникальной по глубине и широте охвата научных проблем. Он был в той группе лидеров, которая непосредственно направляла драматическое развитие естествознания последнего пятидесятилетия. Поэтому книга о драме идей носит автобиографические черты его личного переживания этой драмы.

Напряженная работа над решением фундаментальных проблем у Зельдовича органически сочеталась с заботой о ее будущем — о воспитании новых поколений исследователей.

«В связи с обсуждением того, как учить молодое поколение физике, я хотел бы упомянуть одну общую трудность.

Законы физики сформулированы в виде дифференциальных уравнений: таковы, например, ньютоновские законы движения материальной точки, твердого тела или же гироскопа. Максвелловские законы электромагнитного поля — это уравнения в частных производных, так же записываются и законы газодинамики.

Школьники способны понять весь этот материал.

Однако точнее будет утверждать, что они не способны глубоко понимать и любить физику, если нужный для этого запас математических терминов отсутствует. Вот мое главное замечание: в большинстве случаев обучение математическому анализу начинается с опозданием и включает затруднительные элементы теории множеств и пределов.

Так называемые «строгие» доказательства и теоремы существования гораздо сложнее, нежели интуитивный подход к производным и интегралам.

В результате нужные для понимания физики математические идеи достигают школьников слишком поздно. Так же можно подавать соль и перец не на обед, а чуть позже — к пятичасовому чаю».

«Когда подрастали мои дети, я просмотрел школьные учебники и решил написать новый... Возникла книга «Высшая математика для начинающих физиков и техников».

Так в замысле нашей книги соединились и его личные размышления о прошлом науки, и забота о ее будущем.

Мы начали писать книгу весной 1982 г. Непосредственным толчком к этому послужила наша совместная работа (его — в качестве редактора, моя — в качестве одного из авторов) над изданием энциклопедии «Физика космоса». Ряд фундаментальных вопросов теории элементарных частиц, непосредственно не относившихся к содержанию этого издания, но играющих важную роль в развитии современной теоретической астрофизики и космологии, вызвал желание проследить, как в истории физики понятия элементарной частицы, заряда, поля наполнялись по мере развития науки новым содержанием.

Черновым наброском плана книги стала популярная лекция Якова Борисовича о физике элементарных частиц, прочитанная им в Институте космических исследований весной 1982 г. В ней ясно прозвучали многие центральные идеи книги, в частности революционный характер смены представлений об элементарных частицах, произошедший в 30-х годах, — переход от вечных частиц к вечным зарядам.

Несмотря на достаточно ясный общий план, работа над книгой растянулась на пять лет. Ее содержание в той или иной мере затрагивало практически все основные вопросы теоретической физики, и было трудно соединить доступность изложения с минимумом ущерба для научной строгости.

Неожиданную помощь оказало нам появление книги Л. Б. Окуня « $\alpha\beta\gamma \dots Z$ ». Задача упростилась — теперь нам не надо было подробно описывать современные представления об элементарных частицах. Мы смогли полностью сосредоточиться на эволюции этих представлений. И, работая в этом ключе, мы поняли, что первоначальное название книги «Частицы, поля, заряды» может быть не более чем подзаголовком ее настоящего названия «Драма идей в познании природы». Здесь подстерегала другая объективная трудность — оценка современных тенденций развития физики. Обращение к прошлому для осмысления сегодняшней ситуации было одним из стимулов работы над книгой. Было интересно «влезть в шкуру», скажем, современников Дирака и Ферми и «кожей ощутить», каково им было принять идею античастицы, принять представление о возможности рождения и уничтожения элементарных частиц. В середине 80-х годов такое «вживание» в прошлое физики было психологически важно для осознания ее настоящего и перспектив будущего. Магистраль развития теории элементарных частиц уходит далеко за пределы возможностей ее прямой экспериментальной проверки. В этих условиях психологическая перестройка в подходе к соотношению теории и опыта выходит на передний план. Обращаясь к драматической истории идей физики, мы яснее понимаем и нашу роль в ее сегодняшней драме, и наши задачи в ее дальнейшем развитии.

Фиксированный объем книги заставлял себя ограничивать. На рукописных вариантах сохранилась россыпь пометок Якова Борисовича «...но это уже не для этой книги» — с идеями, возникавшими в связи с затронутыми в книге вопросами.

В работе над книгой на глазах оживал диалектический процесс развития научных идей. Приведу один сюжет, рассказанный мне Яковом Борисовичем в связи с обсуждением в книге силовых линий поля. Вопрос о том, имеет ли это удобное для электродинамики понятие физический смысл, стал в 30-е годы предметом острой дискуссии между В. А. Фоком и специали-

стом по электротехнике Мицкевичем. Фок, активно отрицавший физическую осмысленность этого понятия, относил этот вопрос к таким «бессмысленным» вопросам, как «Какого цвета меридиан?» На что, утверждавший фундаментальное значение силовых линий, Мицкевич ехидно отвечал: «Странно, что Фок не знает о красном цвете нашего советского меридиана». «Можно было бы заключить, — заканчивал Зельдович свой рассказ, — что в этой дискуссии Фок олицетворяет чистоту и бескомпромиссность настоящей науки, а Мицкевич — просто демагог. Но истина сложнее, потому что для магнитного поля, замороженного в плазму, магнитные силовые линии имеют явный физический смысл».

Диалектический, а не метафизический характер отрицания идей в развитии науки был органичен для мышления Зельдовича. Потому таким животворным, эмоционально захватывающим было общение с ним и в научной работе, и в работе над этой книгой.

Гений концентрирует все человеческое. Он настолько разносторонен, что трудно оценить число томов, которое могло бы охватить воспоминания о Якове Борисовиче всех, кто его знал. И это были бы только живые воспоминания о его словах и поступках. По ним можно лишь угадывать смутные контуры того, что составляло его истинную суть, природу его гения.

Гений Зельдовича бессмертен. Его жизнь продолжается в нашей памяти, сохраняет живую силу в продолжателях его дела.

3 марта 1988 г.

*М. Ю. Хлопов*

# СОДЕРЖАНИЕ

---

ЯКОВ БОРИСОВИЧ ЗЕЛЬДОВИЧ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
КЛАССИЧЕСКАЯ ФИЗИКА	22
Элементарность и неделимость	22
Электрический заряд	24
Электрический ток и магнитные явления	26
Напряженность и потенциал	30
Электромагнитная индукция	34
Электромагнитное поле	36
Теория Максвелла. Ток смещения	42
Ток смещения и сохранение заряда	45
Электромагнитные волны	47
Распространение электромагнитных	52
Электричество, магнетизм и принцип относительности	55
КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	61
Загадки электрона	61
Атом. Принцип Паули	66
Теория Дирака	70
«Ядерные электроны»	73
Нейтрино	76
Позитрон	78
Элементарные частицы	80
Рождение и уничтожение частиц	82
СИММЕТРИЯ ЧАСТИЦ И ЗАРЯДОВ	86
Симметрия нейтрона и протона	86
Теория Юкавы. Мезоны	92
Странные времена — странные частицы	94
Составные модели частиц	97
Кварки	100
Трудности теории кварков	101
Цвет кварков	103
Квантовая хромодинамика	104
Свободные кварки в нуклоне	108
«Ноябрьская революция»	109
Кварки в $e^+e^-$ -аннигиляции	111
Конфайнмент	112
Реальность глюонов и кварков	116
Четность	118
Несохранение четности	122



Возможен ли зеркальный мир?	125
Лептонные заряды	129
Поле слабого взаимодействия	131
Нейтральные токи	133
Реальность W- и Z-бозонов	135
Предсказанное очарование	136
Предварительные итоги	137
Великое объединение	139
<b>ГРАВИТАЦИЯ</b>	<b>143</b>
Гравитационное поле. Факты	143
Гравитационное поле — теория Ньютона	147
Физика искривленного псевдоевклидова пространства	153
Тяготение и другие силы	155
Тяготение как поле в плоском пространстве	158
Мечты теоретиков конца восьмидесятых годов	162
Частицы и Вселенная	164
Барионная асимметрия	167
Инфляционная Вселенная	171
Плотность энергии вакуума и космологическая постоянная	174
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ДОПОЛНЕНИЕ</b>	<b>179</b>
Векторы	179
Скалярное произведение	183
Векторное произведение	185
Тензоры	188
4-векторы	188
Пространство-время	190
Производная функции одной переменной	191
Закон Ньютона как дифференциальное уравнение	194
Пространственные производные	195
Поле	196
Градиент скалярного поля	197
Потенциальное силовое поле. Работа электрической силы	202
Непотенциальное вихревое поле	206
Циркуляция	211
Ротор векторного поля	212
Закон Гаусса	213
Напряженность электрического поля заряженной сферы	217
Дивергенция электрического поля	219
Комплексные числа	221
Уравнения Максвелла	224
Электромагнитные волны	227
<b>С ФИЗИКОЙ НА «Я» (М. Ю. Хлопов)</b>	<b>231</b>

**Научно-популярное издание**

*Зельдович Яков Борисович*

*Хлопов Максим Юрьевич*

**ДРАМА ИДЕЙ В ПОЗНАНИИ ПРИРОДЫ**  
**(частицы, поля, заряды)**

---

«Библиотечка «Квант», вып. 67

Редактор *В. Я. Дубнова*

Художник *П. И. Чернуский*

Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*

Технический редактор *В. Н. Кондакова*

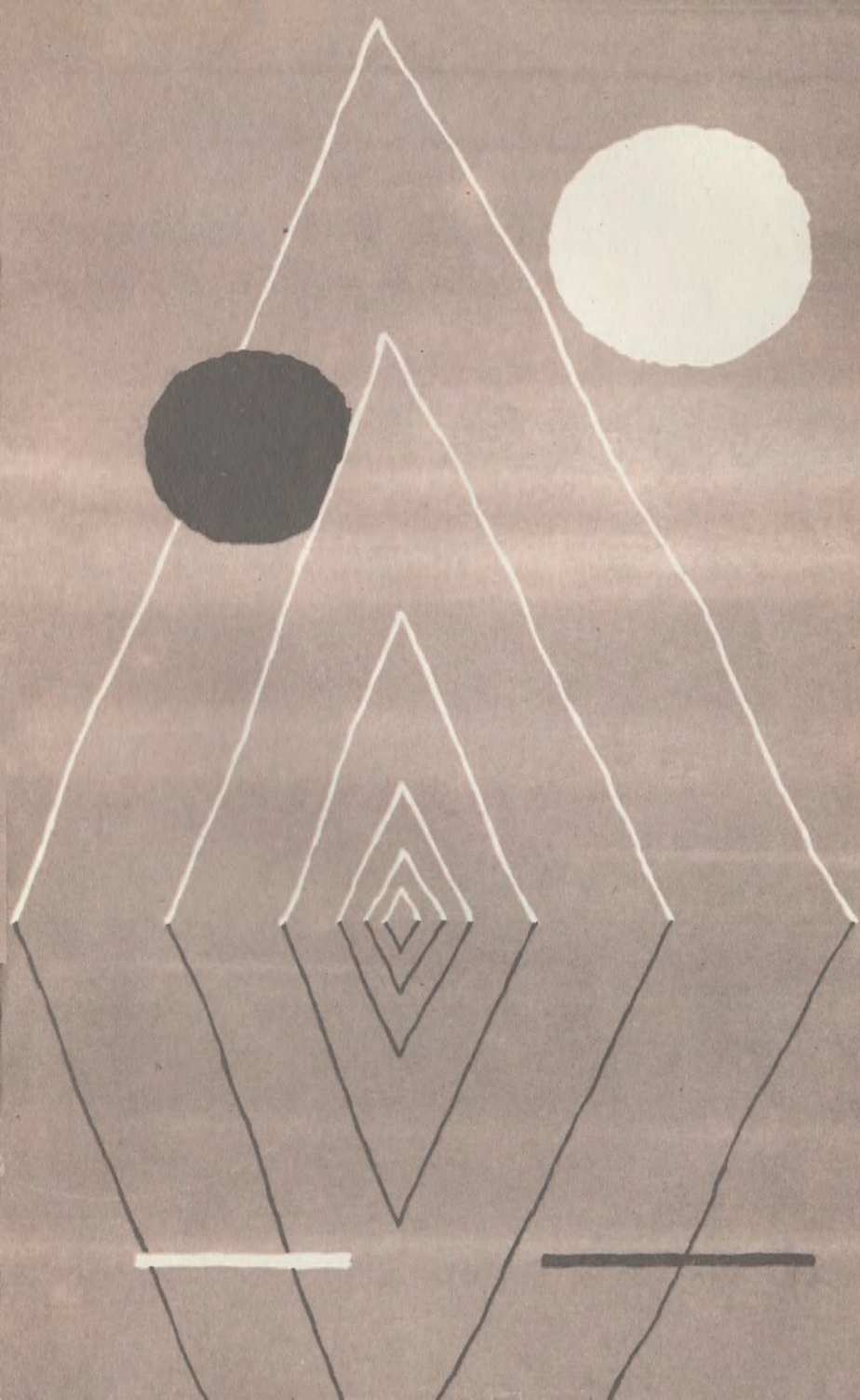
Корректоры *М. В. Петанов, О. М. Березина*

ИБ № 32663

Сдано в набор 16.10.87. Подписано к печати 01.07.88. Т-15760. Формат 84×108/32.  
Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 12,6.  
Усл. кр.-отт. 13,44. Уч.-изд. л. 13,01. Тираж 98000 экз. Заказ № 756. Цена 50 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»  
Главная редакция физико-математической литературы  
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового  
Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга»  
им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комите-  
тете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 198052,  
г. Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29,



50 коп.

---

