

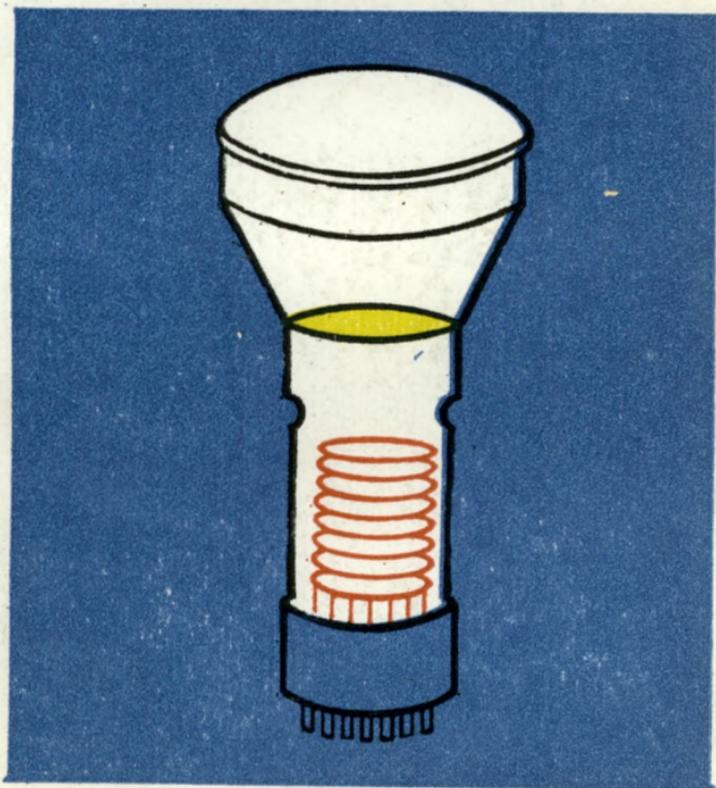


БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •

выпуск 15

А.А. БОРОВОЙ

# КАК РЕГИСТРИРУЮТ ЧАСТИЦЫ



22.38

583



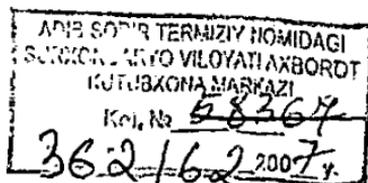
БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»  
выпуск 15

А.А. БОРОВОЙ

# КАК РЕГИСТРИРУЮТ ЧАСТИЦЫ

По следам нейтрино

Под редакцией  
П. Е. СПИВАКА



МОСКВА «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
1981

22.38

Б 83

УДК 539.12

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Академик И. К. Кикоин (председатель), академик А. Н. Колмогоров (заместитель председателя), член-корреспондент АН СССР А. А. Абрикосов, академик Б. К. Вайнштейн, заслуженный учитель РСФСР Б. В. Воздвиженский, академик В. М. Глушков, академик П. Л. Капица, профессор С. П. Капица, член-корреспондент АН СССР Ю. А. Осипьян, член-корреспондент АН СССР В. Г. Разумовский, академик Р. З. Сагдеев, профессор Я. А. Смородинский, академик С. Л. Соболев, член-корреспондент АН СССР Д. К. Фаддеев, член-корреспондент АН СССР И. С. Шкловский

**Боровой А. А.**

**Б 83** Как регистрируют частицы (По следам нейтрино).— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981.— 176 с., илл.— (Библиотечка «Квант». Вып. 15) — 30 коп.

Пятьдесят лет назад было предсказано существование частицы, которую, как сначала казалось, невозможно обнаружить никакими способами. Физикам понадобился многолетний, упорный труд, талант и изобретательность, чтобы зарегистрировать «нейтрино», открыть многие тайны природы, связанные с этой частицей. А еще им понадобились приборы — детекторы элементарных частиц, самые чувствительные в мире. Об этих приборах, о том, как ставят эксперименты, о нейтрино и о некоторых ученых расскажет эта книга.

Б  $\frac{20408-132}{053(02)-81}$  189-82. 1704070000

**ББК 22.38**

**530.4**

Б  $\frac{20408-132}{053(02)-81}$  189-82. 1704070000

© Издательство «Наука»,  
Главная редакция  
физико-математической  
литературы, 1981

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	5
Часть I. ЧАСТИЦЫ ПРОХОДЯТ СКВОЗЬ ВЕЩЕСТВО . . . . .	7
Глава 1. Взаимодействия . . . . .	7
Глава 2. Тяготение . . . . .	9
2.1. Закон всемирного тяготения (9). 2.2. О законах сохранения (11). 2.3. Немного о симметрии (14). 2.4. Сохранение момента импульса (15). 2.5. Небольшое отступление (17). 2.6. Задача двух тел (18). 2.7. Вопросы и задачи (20).	
Глава 3. Электромагнетизм и строение атома . . . . .	21
3.1. Уравнения Максвелла (21). 3.2. Открытие электрона (24). 3.3. Закон сохранения заряда (29). 3.4. Атом Томсона (30). 3.5. Радиоактивность (30). 3.6. Модель атома Резерфорда (33). 3.7. Квантовый атом (35). 3.8. Вопросы и задачи (39).	
Глава 4. Следы заряженных частиц . . . . .	40
4.1. Ионизация и возбуждение (40). 4.2. Потери на излучение (43). 4.3. Излучение Вавилова — Черенкова (44). 4.4. Вопросы и задачи (48).	
Глава 5. Фотон и вещество . . . . .	49
5.1. Фотоэффект и комптон-эффект (49). 5.2. Соотношение неопределенности (50). 5.3. Предсказание позитрона (53). 5.4. «Случайное» открытие (55). 5.5. Космические лучи и камера Вильсона (55). 5.6. Позитрон и «спары» (59). 5.7. Антивещество (62). 5.8. Вопросы и задачи (63).	
Глава 6. Внутри ядра . . . . .	63
6.1. Нейтроны и ядерные силы (63). 6.2. Открытие Ферми (66). 6.3. Поля (68). 6.4. Сохранение барионного заряда (70). 6.5. Вопросы и задачи (71).	
Глава 7. Слабые взаимодействия . . . . .	72
7.1. Почему они слабее? (72). 7.2. Загадки бета-распада (73). 7.3. На сцене появляется нейтрино (75). 7.4. Теория Ферми (76). 7.5. Эпизик Ферми (77). 7.6. Вопросы и задачи (79).	

Часть II. ДЕТЕКТОРЫ И НЕЙТРИНО . . . . . 80

Глава 1. Сцинтилляторы и открытие нейтрино . . . . . 80

- 1.1. Как зарегистрировать нейтрино? (80). 1.2. Ядерные реакторы — источники нейтрино (83). 1.3. Немного истории (84). 1.4. Как энергия частиц преобразуется в свет (85). 1.5. Современный сцинтилляционный счетчик (88). 1.6. Сцинтиллятор для нейтрино (92). 1.7. Источники фона (92). 1.8. Долгожданная победа (96). 1.9. Нейтрино рассеивается на электроне (99). 1.10. Вопросы и задачи (102).

Глава 2. Радпохишия, Солнце и нейтрино . . . . . 103

- 2.1. Опять немного истории (103). 2.2. Опыты Дэвиса (106). 2.3. Об эксперименте с отрицательным результатом (109). 2.4. Поиски солнечных нейтрино (111). 2.5. Поляризованное нейтрино (114). 2.6. Сохранение лептонного заряда (116). 2.7. Вопросы и задачи (117).

Глава 3. Счетчики, камеры и сюрпризы слабого взаимодействия . . . . . 117

- 3.1. Газовый разряд (117). 3.2. Типы газоразрядных счетчиков (118). 3.3. Счетчик для солнечных нейтрино (122). 3.4. Искровая камера (124). 3.5. Гипотеза о двух типах нейтрино (126). 3.6. Нейтринные эксперименты на ускорителях (128). 3.7. Вопросы и задачи (132).

Глава 4. Двойной бета-распад. Полупроводниковые счетчики 133

- 4.1. Специализация (133). 4.2. Когда из ядра вылетают два электрона (135). 4.3. Геологические эксперименты (137). 4.4. Полупроводниковый счетчик (139). 4.5. Опыт Флорипи (141). 4.6. Вопросы и задачи (143).

Глава 5. Как «устроено» слабое взаимодействие . . . . . 144

- 5.1. Пора подвести некоторые итоги (144). 5.2. Взаимодействие (145). 5.3. Пузырьковые камеры (147). 5.4. Нейтральные токи (150). 5.5. Вопросы и задачи (152).

Глава 6. Новые идеи и новые детекторы . . . . . 152

- 6.1. Нейтрино осциллирует? (152). 6.2. Проект ДЮМАНД (157). 6.3. Практика и нейтрино (160).

Глава 7. Совсем короткое заключение . . . . . 161

Ответы и решения . . . . . 163

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Появление этой книги, как ни странно, связано с романом выдающегося польского писателя-фантаста Станислава Лема — «Солярис». Началось с того, что на экранах телевизоров показывали фильм, снятый по этому произведению. Как бывает довольно часто, зрители кинулись читать и перечитывать роман.

Три космонавта живут на далекой планете. Они столкнулись со странным и страшным явлением: на станции появляются люди из их воспоминаний. Потом мы узнаем, что планета Солярис представляет собой разумное существо. Она проводит эксперименты с космонавтами, как с подопытными животными, посылая к ним копии людей. Так называемые существа F (фантомы). Копии созданы столь совершенно, что герои могут доказать «подделку» только с помощью специальной аппаратуры. Они исследуют кровь фантома на атомном уровне и доходят до мельчайших частиц, из которых она состоит. Вот трое ученых обмениваются мнениями:

— Последним элементом конструкции наших тел являются атомы.

— Предполагаю, что существа F построены из частиц, меньших, чем обычные атомы. Гораздо меньших.

— Из мезонов? — подсказал Сарториус. Он вовсе не удивился.

— Нет, не из мезонов... Пожалуй, скорее, НЕЙТРИНО. Так неосторожно предположил главный герой романа доктор Крис Кельвин. Неосторожно, потому что расплачиваться за эти слова пришлось совсем постороннему человеку.

Дело в том, что в Москве, при Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова, начиная с 1968 г., работает Школа естественных наук (ШЕН). Ее учащиеся — школьники старших классов — слушают по вечерам лекции и участвуют в семинарах по физике, математике, биологии. Автор читал в ШЕН в течение многих лет курс физики.

Наряду с обычными вещами этот курс должен был включать в себя и рассказы о современной физике, о том, как физики работают, ставят эксперименты.

И вот, лектора буквально затопили вопросами о нейтринно. Каких человечков можно из них сделать? Какие силы будут удерживать эти частицы? Откуда такое слово, имеющее нежный оттенок? И сотнями других вопросов, так что его положение стало не намного легче, чем у персонажей Лема.

Пришлось договориться, что теперь, когда речь пойдет о методах исследования современной физики ядра и элементарных частиц, все будет иллюстрироваться нейтринными экспериментами. Постепенно таким рассказам отводилось все больше места. Ведь принципы регистрации частиц — очень удобная почва для приложения знаний по механике, электричеству, оптике, полученных в курсе общей физики.

В ходе занятий вопросы лектора и вопросы аудитории позволили составить нечто вроде тоненького сборника для семинарских занятий. Многие из задач были почерпнуты из истории физики и дополняли то, что не удалось рассказать подробно.

Хотя существуют десятки хороших популярных книг на эти же темы, мне кажется, читателям «Кванта» было бы не бесполезно познакомиться с этими лекциями и задачами.

Из сказанного очевидно, что предлагаемая книга в первую очередь рассчитана на молодежь, интересующуюся проблемами ядерной физики и физики элементарных частиц. Чтобы свободно ее читать, достаточно знаний в объеме девяти классов средней школы. Самые трудные вещи встретятся в первой и во второй главах. Если же у читателя хватит сил добраться до дня рождения нейтрино, то дальше, как надеется автор, он легко справится с оставшимися главами.

*А. Боровой*

## ЧАСТИЦЫ ПРОХОДЯТ СКВОЗЬ ВЕЩЕСТВО

### Глава 1 ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

«Природа неистощима в своих выдумках».

«И это чудо, что несмотря на поразительную сложность мира, мы можем обнаруживать в его явлениях определенную закономерность».

Два с половиной века разделяют авторов этих слов. Первый — Исаак Ньютон, второй — один из создателей квантовой механики — Эрвин Шредингер.

Действительно, чудо! Как художник, который смешивает несколько основных цветов и создает на палитре сложную гамму красок, так и природа сочетанием небольшого числа основных, фундаментальных сил добывается удивительного многообразия явлений. И ученый должен разобраться в них, отделить важное от второстепенного, пытаться найти первооснову мира. Такие попытки восходят к глубокой древности. За шестьсот лет до нашей эры греческий мудрец Фалес из Милета учил, что все во Вселенной образовалось из единой матери — воды. Ему приписывают такие слова:

«Вода есть начало всего, все из нее происходит и в нее превращается». Со временем, у древних философов одна первооснова мира сменяется другой: вода — воздухом, воздух — огнем. Появляются догадки, которые опередили не только века — тысячелетия. Так, Демокрит создает учение об атомах — мельчайших неделимых частицах. Из них, как из кирпичиков, сложено все, в том числе и человеческая душа. Он считал Вселенную бесконечной и материальной — в ней довольно пассивная роль отводилась многочисленным греческим богам. Атеизм Демокрита очень не нравился сначала философам-идеалистам, а в более поздние века — церкви. Они оспаривали идеи ученого и самым сильным «аргументом» было уничтожение

его трудов и трудов других материалистов, так что огромное большинство из их книг дошло до нас только в пересказе оппонентов.

Но не будем последовательно проследивать попытки классификации сил природы и перенесемся в наши дни, когда прочно сложилось представление о четырех основных видах взаимодействия. Это:

1. Силы тяготения (гравитационное взаимодействие).
2. Электромагнитные силы.
3. Ядерные силы (сильное взаимодействие).
4. Слабое взаимодействие.

Больше видов сил пока не найдено, все элементарные частицы обязательно участвуют в гравитационном взаимодействии и еще в одном или нескольких других.

Достаточно долго исследователи накапливали факты, которые говорили об отличии фундаментальных сил друг от друга. И отличие это было огромным. Так, если, для наглядности, выразить величину силы в некоторой условной шкале высот и сопоставить ядерным силам высоту Останкинской телебашни, то электромагнитное взаимодействие окажется на уровне одноэтажного дома, слабое — ростом с пуговицу, а гравитационное — намного меньше всех известных в природе расстояний. Действие тяготения и электромагнитных сил падает по мере увеличения расстояния, но постепенно. Говорят, что эти силы — дальнodelствующие. А вот ядерные взаимодействия резко обрываются, чуть только расстояние между частицами превысит  $10^{-14}$  м. Еще меньше радиус проникновения слабых сил.

И вместе с тем ученые не прекращали попыток отыскать пути к их объединению. Открыть единый источник всех сил в природе, очень далеким прообразом которого служит вода Фалеса Милетского.

Долгие годы думал об этом Альберт Эйнштейн. Известно, что его труды преобразили физику. Но теория броуновского движения, фотоэффекта, специальная и общая теория относительности — были созданы за первые сорок лет жизни ученого (и за двадцать лет его творческой деятельности). А прожил Эйнштейн 76 лет, и последние тридцать, не зная отдыха, боясь потерять даже один день, работал над созданием единой теории тяготения и электромагнетизма. Безуспешно. Титанический труд и горькие слова, сказанные своему верному помощнику — польскому ученому Леопольду Инфельду: «Физики считают меня старым глупцом, но я убежден, что в будущем развитие физики пойдет

в другом направлении, чем шло до сих пор». Хотя конкретный путь, выбранный Эйнштейном, не привел к успехам, над идеей объединения работали многие ученые и, в конце концов, дорога была найдена. Пятнадцать-десять лет назад намечались первые сдвиги. Потом пришли «звездные часы» для физиков, когда ни один год не проходил без крупных открытий. В 1979 г. Нобелевская премия была вручена С. Вайнбергу, Ш. Глешоу, А. Саламу за создание единой теории электромагнитных и слабых взаимодействий. Уже разрабатываются планы «великого объединения» трех видов сил: ядерных, электромагнитных и слабых. И «супергравитация», включающая в этот список еще и тяготение. Единая теория всех взаимодействий в природе приобретает все более осозаемые контуры.

Но не будем спешить. Мы еще вернемся к вопросу о единстве различных сил, а сейчас чуть поглубже познакомимся с каждым из видов взаимодействий и с элементарными частицами, которые участвуют в них.

## Глава 2 ТЯГОТЕНИЕ

### 2.1. Закон всемирного тяготения

На фундаменте трудов многих ученых, многолетних астрономических наблюдений, покоятся законы небесной механики, открытые в начале XVII века. Сформулировал их Иоганн Кеплер.

«Чтобы философ мог свободно предаваться изучению, для него необходимы, по крайней мере, кров и пицца». Даже эти скромные требования удовлетворялись в то время далеко не всегда. Кеплер много странствовал (в поисках крова и пищи), подвергался гонениям церкви, зарабатывал астрологией и умер пятидесяти девяти лет в полнейшей нищете.

Законов Кеплера — три:

1. Планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которого находится Солнце. Эллипс изображен на рис. 1. Его фокусы  $C$  (Солнце) и  $\Phi$ . (Эта фигура обладает тем замечательным свойством, что сумма расстояний любой точки эллипса от  $C$  и  $\Phi$  остается постоянной.)

2. Радиус-вектор, проведенный от Солнца к планете  $\Pi$  ( $r_1$  и  $r_2$  на рис. 1), за равные времена ( $\Delta t$ ) описывает равные площади ( $S_1 = S_2$ ).

3. Квадраты периодов обращения двух планет  $T_1$  и  $T_2$  относятся между собой как кубы больших полуосей их эллипсов:

$$(T_1/T_2)^2 = (b_1/b_2)^3.$$

Кеплер описал «как» движутся планеты, а объяснил «почему» выполняются законы небесной механики Исаак Ньютон. Его книга «Математические начала натуральной философии», в которой Ньютон сформулировал Закон Всемирного тяготения, увидела свет в 1687 г. На обдумывание этого труда и проверку идей, заключенных в нем, Ньютон потратил около двадцати лет.

Выражение для силы гравитационного притяжения двух тел с массами  $m_1$  и  $m_2$  выглядит внешне просто и, наверное, хорошо известно читателю. Тем не менее мы его приведем:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}; \quad (1)$$

здесь  $r_{12}$  — расстояние между телами (сила выглядит так просто, если тела либо точечные, либо шарообразные) и  $\gamma$  — постоянная, равная  $6,672 \cdot 10^{-11}$  единиц СИ ( $\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$ ). Хотя Ньютон пользовался довольно приблизительными опытными данными, он вывел соотношение, справедливое с высокой точностью и в космических масштабах, и в микромире. Оно правильно предсказывало движение небесных тел и только одно небольшое несоответствие закону Ньютона при движении Меркурия было обнаружено уже в XX веке. Объяснение этому пришло в 1916 г., когда Эйнштейн создал общую теорию относительности. Последняя включила в себя закон тяготения Ньютона как частный случай — он справедлив для не очень сильных полей тяготения и для тел, движущихся со скоростями, много меньшими скорости света.

Мы уже говорили, что все частицы участвуют в гравитационном взаимодействии, оно — универсально. Тем не

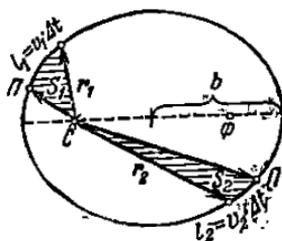


Рис. 1. Солнце и планета, движущаяся по эллипсу.

менее силы, отвечающие за движение планет, приливы и отливы, не играют по современным представлениям никакой роли в мире элементарных частиц. Причина этому — малость гравитационной константы  $\gamma$ . Эта малость может быть скомпенсирована лишь огромными массами тел  $m_1$  или  $m_2$ . А массы элементарных частиц чрезвычайно малы. И если представить себе атом водорода, который связан лишь силами гравитации, то размер его должен превзойти размеры Вселенной.

Итак, дальше нам встретятся лишь три вида взаимодействия — электромагнитное, сильное и слабое, но прежде чем переходить к их описанию, рассмотрим несколько проблем из классической механики. Она возникла раньше других физических теорий и те часто используют задачи, решенные механикой, или механические модели. В механике впервые были сформулированы и законы сохранения.

## 2.2. О законах сохранения

Нам нужно разобраться в том, как элементарные частицы проходят сквозь вещество. При этом происходят сложные превращения — частицы рассеиваются, рождают новые, разбивают атомы и ядра, распадаются и т. п. И здесь приходят на помощь общие законы, которые управляют всеми процессами, вне зависимости от их сложности. Они называются законами сохранения.

Вот, например, распадается ядро тяжелого элемента — калифорния. Оно начинает менять свою форму, вытягивается, в ядре намечаются два новых образования и оно все больше напоминает гантельку. Наконец, силы кулоновского отталкивания разрывают калифорний на два осколка и те разлетаются, испуская радиоактивное излучение. Надо ли знать все эти подробности и уметь описать их на языке формул, чтобы найти, под каким углом разлетаются осколки ядра? Конечно, нет. Закон сохранения импульса позволяет сразу сказать — под углом  $180^\circ$ , т. е. в противоположные стороны. Можно оценить и скорость осколков, зная их массы и энергию, выделяющуюся при делении.

Если некоторая величина сохраняется, то подсчитав ее в начале процесса и в конце, можно приравнять эти два выражения и получить интересную информацию о происходящем процессе. По ходу рассказа мы будем много раз воз-

вращаться к законам сохранения и их круг будет постепенно расширяться, хотя не все они будут равнозначны. Читатель узнает о том, как в результате желания спасти эти законы была придумана удивительная частица — нейтрино. И она станет основным героем этой книги. А сейчас обратимся к механике. В ней действуют три закона сохранения:

**ЭНЕРГИИ,  
ИМПУЛЬСА,  
МОМЕНТА ИМПУЛЬСА.**

Закон сохранения энергии формулируется следующим образом: полная энергия  $E$  системы тел, изолированной или находящейся в постоянном внешнем поле, не меняется (в системе не действуют силы трения). Энергия разделяется на две части. Одна связана со скоростью движения тел и носит название кинетической ( $K$ ), другая — со взаимным расположением тел в пространстве, с их взаимодействием. Она называется потенциальной энергией ( $\Pi$ ). Для системы, состоящей всего из двух тел и находящейся далеко от других объектов, справедливо равенство

$$E = K_1 + K_2 + \Pi_{12} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \Pi_{12}, \quad (2)$$

$\Pi_{12}$  — потенциальная энергия взаимодействия этих тел; если между ними действуют только силы тяготения, она равна

$$\Pi_{12} = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r_{12}}. \quad (3)$$

Скорость элементарных частиц часто приближается к скорости света, а силы взаимодействия между ними достаточно велики. В этом случае классическая механика должна уступить свое место теории относительности. Мы не будем (да и не можем в этой книге) сколько-нибудь подробно рассказывать об этой замечательной теории; нам понадобятся лишь некоторые ее выводы и, прежде всего, соотношение между массой и энергией. Начнем с формул. Энергия одного тела, движущегося со скоростью  $v$ , равна

$$E = Mc^2,$$

где

$$M = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3)$$

— масса движущегося тела,  $m_0$  — масса покоящегося тела, а  $c$  — скорость света в пустоте, равная  $3 \cdot 10^8$  м/с. Мы видим, что масса движущегося тела зависит от его скорости. В классической механике масса определялась «инертностью» тела, т. е. его способностью менять свое состояние не сразу, а постепенно. От быстроты движения «инертность» не зависит и в постоянном ускоряющем поле частица должна была бы разгоняться до любой скорости.

В теории относительности инертность возрастает вместе с возрастанием  $v$ , частица все сильнее сопротивляется внешнему воздействию и никогда не достигнет скорости, равной скорости света, — если только у этой частицы  $m_0 \neq 0$ . В противном случае, чтобы существовать, она обязана всегда двигаться со скоростью  $c$ .

Перейдем теперь к вопросу о массе покоя тела  $m_0$ . Для упрощения задачи рассмотрим объект, летящий с не очень большой скоростью  $v$  (пусть  $v \leq 0,1 c$ ). Тогда можно показать (выкладки не сложные, но громоздкие, и лучше читателю проделать их самостоятельно), что из формулы (3) следует

$$E \approx m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2}.$$

Второе слагаемое хорошо знакомо, это — «обычная» кинетическая энергия. Что же касается первого слагаемого, то в классической механике никакой аналогии ему нет, оно существует при  $v = 0$  и называется *энергией покоя*:

$$E_0 = m_0 c^2; \quad (4)$$

$E_0$  включает в себя энергии покоя частиц, из которых состоит тело, потенциальную энергию их взаимодействия между собой и кинетическую энергию их относительного движения. Все это определяет и массу покоя тела  $m_0$ , связанную с энергией соотношением (4).

В классической физике было два отдельных понятия массы и энергии, и действовали два закона сохранения этих величин. Теория относительности неразрывно связала массу и энергию, и закон сохранения стал единым.

Рассмотрим систему, состоящую из двух тел,  $m_1$  и  $m_2$ . Как уже говорилось, ее энергия покоя  $m_0c^2$  в общем случае не равна сумме  $m_{01}c^2 + m_{02}c^2$ . Если тела притягиваются друг к другу и, следовательно, энергия их взаимодействия отрицательна (например, в тяготении), то разность  $m_0c^2 - (m_{01}c^2 + m_{02}c^2) = \Delta m_0c^2$  тоже отрицательна (при  $K = 0$ ); она носит название *энергии связи* тела. Точно так же  $\Delta m_0 = m_0 - (m_{01} + m_{02}) < 0$ . Величина  $\Delta m_0$  называется *дефектом масс*.

Система устойчива, если ее энергия связи (и дефект масс) меньше нуля. Чтобы ее разрушить, необходимо сообщить телам дополнительную энергию, равную или большую по величине энергии связи. Приведем пример из ядерной физики. Ядро атома тяжелого водорода, которое носит название дейтон, состоит из нейтрона и протона, связанных ядерными силами притяжения. Масса нейтрона составляет  $1,6749 \cdot 10^{-27}$  кг, протона —  $1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг, а дейтон весит  $3,3434 \cdot 10^{-27}$  кг; если провести вычисления, то окажется, что  $\Delta m = -4 \cdot 10^{-30}$  кг. Поэтому, чтобы разрушить это ядро, надо затратить энергию  $\Delta m_0c^2 = 3,6 \cdot 10^{-13}$  Дж. Если дефект масс системы частиц положителен, то она распадается самопроизвольно и энергия связи идет на кинетическую энергию движения разлетающихся частей, как это было в случае деления калифорния на два осколка.

Закон сохранения энергии оказался универсальным. Он выполняется для всех видов взаимодействия, так же как и законы сохранения импульса и момента импульса, речь о которых пойдет впереди. Почему эти законы столь всеобъемлющи? Современная наука отвечает: из-за того, что они связаны с самыми общими свойствами симметрии пространства и времени.

### 2.3. Немного о симметрии

Если после определенных перемещений предмет вновь приобретает первоначальный вид, то говорят, что он симметричен. Образцом симметрии всегда служил шар. Как бы мы ни вращали его вокруг центра — ничего не меняется. Симметричны могут быть и уравнения, если после некоторого преобразования входящих в них величин вид уравнений не изменяется.

Для примера возьмем главное уравнение классической механики — 2-й закон Ньютона,

$$F = ma.$$

Легко убедиться, что это уравнение «не почувствует», если мы перенесем начало координат. Действительно, сила зависит от взаимного расположения тел, ускорение связано с изменением скорости, масса останется прежней. Таким образом, уравнение движения симметрично относительно переноса в пространстве.

Физики впервые заинтересовались вопросами симметрии, когда начали изучать строение кристаллов — это было около ста пятидесяти лет назад. В последние годы все теории элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий опираются на определенные принципы симметрии, существующей в природе. Но еще раньше, в 1918 г., Эмми Нетер, которая, по словам Эйнштейна, «входила в число самых замечательных и самых творческих гениев математики», доказала теорему, связавшую законы сохранения и свойства пространства и времени.

Физические законы не изменяются, если произвести смещение во времени на промежуток  $\Delta t$ . Это означает, что эксперимент, произведенный сегодня и повторенный завтра, при одинаковых прочих условиях, даст один и тот же результат. Время о д н о р о д н о. Из этого свойства времени вытекает закон сохранения энергии!

А закон сохранения импульса основывается на *однородности* пространства. При переносе установки в пространстве результаты опыта не изменятся. Математическое выражение этого закона выглядит так:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \\ = m_1 v_1 + m_2 v_2 + \dots + m_n v_n = \text{const.} \quad (5)$$

Полный импульс сохраняется в системе, которая не подвергается внешним воздействиям. Здесь  $P_1, P_2, \dots, P_n$  — импульсы  $n$  тел системы, равные произведению массы тела на его скорость.

В теории относительности  $P = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$ .

#### 2.4. Сохранение момента импульса

Первые два закона сохранения — энергии и импульса, гораздо более известны, чем третий — сохранения момента импульса. Причина состоит в том, что он обычно не включается в школьный курс. Для иллюстрации этого закона воспользуемся примером из небесной механики. Нам понадобится второй из законов Кеплера (см. стр. 10)

в рис. 1, на котором представлен эллипс, описываемый планетой  $\Pi$ . За равные промежутки времени  $\Delta t$  она проходит в одном случае дугу  $l_1$ , во втором  $l_2$ . Если  $\Delta t$  мало и дуги можно заменить отрезками прямой, то на основании второго закона Кеплера площади двух треугольников  $\frac{1}{2}r_1l_1$  и  $\frac{1}{2}r_2l_2$  равны. Следовательно,

$$r_1v_1\Delta t = r_2v_2\Delta t$$

и

$$r_1v_1 = r_2v_2 = \text{const.} \quad (6)$$

Мы видим, что при движении планеты сохраняется произведение ее радиуса-вектора на скорость. Как следствие этого: вблизи от Солнца движение быстрее, вдали — медленнее.

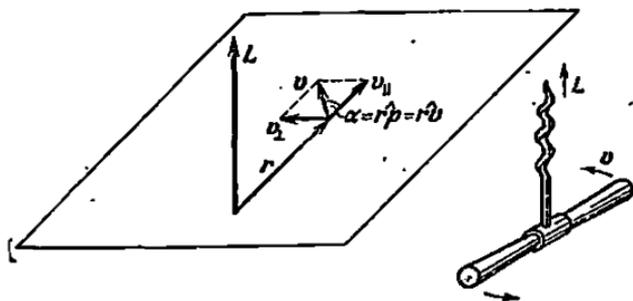


Рис. 2. Момент импульса.

Умножим обе части равенства (6) на массу планеты  $m$ . Величина  $L = mvr = rp$ , равная площади, описываемой радиусом-вектором за единицу времени, умноженной на массу планеты, называется ее *моментом импульса*. При этом в выражение для момента какого-либо тела относительно центра вращения входит не полная скорость, а только ее составляющая, перпендикулярная к радиусу-вектору, так что будет правильнее записать  $L = mv_{\perp}r$  (рис. 2). Момент импульса имеет и направление — он вектор. Это направление можно находить по правилу буравчика (см. рис. 2). Если внешние силы не раскручивают тела системы и не тормозят их, то выполняется закон сохранения полного момента импульса такой системы. В общем случае его сохранение связано со свойством симметрии пространства, называемым *изотропией*. Оно означает, что при повороте системы в пространстве вокруг некоторой точки физические явления, происходящие в ней, не меняются.

## 2.5. Небольшое отступление

Законы сохранения помогут нам решить задачу о движении двух тел, которая в небесной механике носит имя Кеплера. Но прежде небольшое отступление.

362/62  
Это произошло в конце тридцатых годов. После одного семинара, на котором начинающий физик делал сообщение, к нему обратился академик Иоффе. Говорил он, как обычно, негромко и очень вежливо. «Вы знаете ... (тут следовало имя и отчество молодого коллеги), никогда не следует делать детектив из научного доклада. Слушателям должна быть сразу ясна главная цель работы, хорошо сообщить им и план рассказа. Иначе все будут заниматься деталями, которые потом окажутся второстепенными, не усвоят главного и захотят, простите, спать». Академик помолчал и процитировал Марка Твена: «Если в Ваших словах есть какой-либо смысл, то не стесняйтесь и скорее сообщите его нам».

А надо сказать, что Абрам Федорович Иоффе был не просто выдающимся ученым. Он был и выдающимся учителем. В списке его учеников большинство физиков, прославивших советскую науку: А. П. Александров, А. И. Алиханов, А. И. Алыханян, Л. А. Арцимович, П. Л. Капица, И. К. Кикоин, И. В. Курчатов, Л. Д. Ландау, Н. Н. Семенов и многие, многие другие.

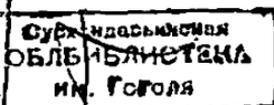
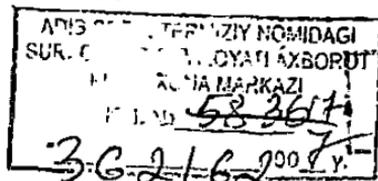
Эту историю рассказали студентам Московского инженерно-физического института лет двадцать назад, непосредственно после окончания семинара, на котором один из нас делал доклад о задаче Кеплера и, прямо надо признаться, сумел все страшно запутать.

А здесь она приведена по таким причинам:

Во-первых, мы должны сейчас перейти к решению именно этой задачи, хотя и в чрезвычайно упрощенном виде.

Во-вторых, автор не смог последовать совету Иоффе и отнес рассказ о ее приложениях в следующие главы (может быть, для популярной книжки простителей «слабый налет» детектива?).

В-третьих, и это, пожалуй, самое главное, мне хотелось, чтобы слова мудрого человека услышали те, кто собирается посвятить свою жизнь науке.



## 2.6. Задача двух тел

В самом общем виде задача формулируется так: надо описать возможные виды движения двух тел, если известно, какие силы действуют между ними. Упростим ее, как только возможно. Будем считать, что масса одного тела ( $M$ ) во много раз больше массы другого ( $m$ ), чтобы движением тяжелого тела можно было пренебречь. Так от двух тел мы перейдем к задаче о движении одного тела под действием известной силы. Пусть это будет сила притяжения, которая убывает с расстоянием, как  $1/r_{12}^2$ . Из знакомых сил так себя ведет сила тяготения и кулоновская (между разноименными зарядами).

Потенциальная энергия взаимодействия запишется как

$$\Pi = -\alpha/r_{12}$$

(для гравитации  $\alpha = \gamma Mm$ , для кулоновских сил  $\alpha = q_1 q_2 / (4\pi\epsilon_0)$ , где  $q_1$  и  $q_2$  — величины зарядов тел,  $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$  ед. СИ).

Кинетическую энергию удобно представить в виде

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2),$$

$v_{\parallel}$  и  $v_{\perp}$  — составляющие скорости малого тела, направленные соответственно по радиусу-вектору, соединяющему тела, и перпендикулярно ему. Полная энергия  $E$  равна

$$E = \frac{mv_{\parallel}^2}{2} + \frac{mv_{\perp}^2}{2} - \frac{\alpha}{r_{12}}. \quad (7)$$

При движении легкого тела в поле тяжелого сохраняется момент импульса

$$L = mr_{12}v_{\perp} = \text{const};$$

тогда

$$E = \frac{mv_{\parallel}^2}{2} + \frac{L^2}{2mr_{12}^2} - \frac{\alpha}{r_{12}}. \quad (8)$$

В этом выражении для полной энергии последние два члена зависят только от положения тела в пространстве и могут быть объединены понятием «аффективной» потенциальной энергии  $\Pi_{\text{эфф}}$ . Обратимся к рис. 3, а. На нем изображен график зависимости  $\Pi_{\text{эфф}}$  от  $r_{12}$ . Для больших рас-

стояний эффективная потенциальная энергия совпадает с обычной энергией  $\Pi$ , так как  $L^2/2mr_{12}^2$  убывает гораздо быстрее, чем  $-\alpha/r_{12}$ , и скоро перестает играть какую-либо роль. Для малых энергий все определяет первый

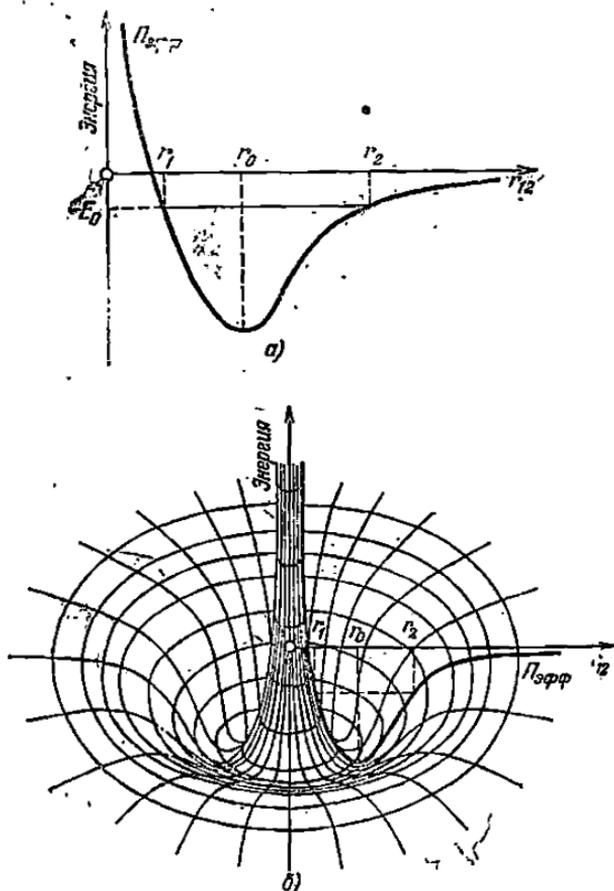


Рис. 3. Задача двух тел.

член, он растет быстрее, чем падает  $\Pi$ . В результате совсем малые  $r_{12}$  становятся недоступны легкому телу, несмотря на то, что на него действует сила притяжения.

Действительно, если оно имеет полную энергию

$$-E_0 = K + \Pi_{\text{эфф}} < 0,$$

то движение ограничено и происходит между  $r_1$  и  $r_2$ . Ни ближе, ни дальше тело находиться не может, иначе пол-

ная энергия станет меньше потенциальной — т. е. кинетическая энергия будет отрицательной.

Как говорят, — легкое тело находится в потенциальной яме. Это хорошо видно на рис. 3, б, где изображена зависимость  $P_{эфф}$  от  $r_{12}$  в пространстве. Тело с массой  $m$  может двигаться внутри воронки, подниматься на некоторую высоту ( $-E_0$ ), но совсем выпрыгнуть и уйти на бесконечность у него не хватает энергии. Движение на дне воронки осуществляется по круговой орбите с радиусом  $r_0$ . В других случаях тело движется по эллипсу.

Для того чтобы тела могли разойтись на бесконечно большое расстояние, необходимо сообщить системе дополнительную энергию  $\Delta E = E_0$ . При этом останется только одно ограничение на движение — со стороны малых  $r_{12}$  (если  $L \neq 0$ ).

Тогда траектория будет представлять собой незамкнутую кривую параболу. Легкое тело приходит из бесконечности и уходит на бесконечность. Если  $E_0 > 0$ , то траектория оказывается гиперболой.

## 2.7. Вопросы и задачи

1. В 1683 г. английский астроном Эдмунд Галлей, используя законы Кеплера, показал, что сила притяжения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Однако он не смог доказать, что при этом планеты будут двигаться по эллипсам. Галлей был другом Ньютона и рассказал ему о неудаче. Очень скоро он получил от Ньютона послание, содержащее решение этой задачи. Покажите, что законы Кеплера позволяют получить зависимость силы тяготения планеты к Солнцу от ее массы и радиуса обращения для случая круговой орбиты.

(Задача, решенная Галлеем).

2. Тело находится на таком же расстоянии от Земли, как Луна. Сколько времени оно будет падать на Землю, если период обращения Луны вокруг Земли (лунный месяц) равен 27,3 дня?

3. Сравните силы гравитационного и кулоновского притяжения между протоном и электроном ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$  кг,  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг).

4. Искусственный спутник массой  $m$  движется вокруг Земли по эллипсу. Наименьшее расстояние между ними  $a_1$ , наибольшее  $a_2$  ( $a_1 \gg$  радиуса Земли). Чему равен момент импульса этого спутника относительно Земли?

5. Ядро урана массой  $M$ , летящее со скоростью  $v_1$ , самопроизвольно (спонтанно) распадается на два осколка равной массы, один из которых вылетает со скоростью  $v_2$  под углом  $\alpha$  к первоначальному направлению полета ядра. Определить скорость и угол вылета второго осколка.

## 3.1. Уравнения Максвелла

1 октября 1931 г. в Вестминстерском аббатстве — месте захоронения тех, кого часто награждают эпитетом Великий, недалеко от надгробия Исаака Ньютона собрались крупнейшие физики нашего века. Их имена не раз встретятся на страницах этой книги: Макс Планк, Эрнест Резерфорд, Нильс Бор, Джозеф Джон Томсон. Они стояли перед только что установленными мемориальными досками, чтобы почтить память создателей учения об электромагнетизме: Майкла Фарадея и Джеймса Максвелла.

За сто лет до этого, после долгой и напряженной работы Фарадей открыл закон электромагнитной индукции. И в 1831 г. в Шотландском городе Эдинбурге родился тот, кто смог сконцентрировать мысли Фарадея в строгой форме математических уравнений — уравнений Максвелла.

Ему не была суждена долгая жизнь. Она не изобиловала яркими внешними событиями, но что касается физики — «шла могучим и бурным потоком, глубину которого смогли измерить далеко не сразу» (Дж. Дж. Томсон).

Уравнений Максвелла — четыре. В них — вся совокупность электрических и магнитных явлений, вся классическая электродинамика, создававшаяся в XIX веке.

Однако Максвелл не ограничился просто математическим описанием уже известных фактов. Он уловил глубокую связь, существующую между электричеством и магнетизмом и добавил в одно из уравнений член, который носит название «ток смещения». Это добавление (многие сказали бы «произвольное» потому, что соответствующего физического явления еще никто не наблюдал) имело далеко идущие следствия.

Появилось решение уравнений, описывающее электрическое и магнитное поля, которые существуют в пустом пространстве без зарядов и токов. Такое единое электромагнитное поле распространяется в виде волны со скоростью света  $c$ .

До работ Фарадея и Максвелла в физике существовали три различные области: электричество, магнетизм, оптика. Открытие Фарадеем электромагнитной индукции на-

метило объединение двух первых областей. Но он не успел выполнить свое заветное желание: «намагнитить и наэлектризовать луч света и осветить магнитную силовую линию». Сделаны были только первые шаги \*);

Максвелл в своих уравнениях окончательно объединил электричество и магнетизм и показал, что они имеют одну и ту же природу. Это лишь разные стороны единого электромагнитного взаимодействия. А свет представляет собой электромагнитную волну и оптические свойства среды определяются ее электромагнитными свойствами.

Через несколько лет после смерти Максвелла в серии блестящих опытов Генрих Герц доказал существование электромагнитных волн.

Многие ученые внесли свой вклад в окончательную формулировку уравнений Максвелла и их решения для конкретных случаев. Прежде всего следует назвать Гендрика А. Лоренца. Голландский ученый рассмотрел применение теории к системам, состоящим из отдельных зарядов и электромагнитных полей.

Так, было показано, что движущийся заряд излучает электромагнитные волны. Необходимо только, чтобы он двигался с ускорением, так как полная интенсивность излучения пропорциональна  $q^2 a^2$ , где  $q$  — величина заряда и  $a$  — его ускорение. Если заряд колеблется (такой заряд часто называют «осциллятором»), так что его смещение  $x$  из положения равновесия зависит от времени  $t$  по закону

$$x = x_0 \sin \omega t, \quad (9)$$

$x_0$  — амплитуда,  $\omega$  — круговая частота, связанная с обычной частотой  $\nu$  и периодом колебаний  $T$  соотношением  $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$ , то интенсивность излучения пропорциональна четвертой степени частоты, а длина излучаемых волн

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}. \quad (10)$$

Сейчас электромагнитные волны исследованы в очень широком диапазоне. Он простирается от десятков кило-

---

\*) В 1846 г. Фарадей открыл, что магнитное поле влияет на прохождение через вещество поляризованного луча света. В 1938 г. было случайно найдено письмо Фарадея, написанное им «для хранения в запечатанном конверте в архивах Королевского общества». Оно пролежало там около ста лет. В этом письме Фарадей предсказал электромагнитную природу света.

метров (длинные радиоволны) до  $10^{-14}$  м (жесткие гамма-лучи — гамма-лучи большой энергии, рождающиеся в недрах атомных ядер). На рис. 4 приведена шкала волн и названия ее отдельных участков. Конечно, точной границы между ними провести нельзя и жесткое рентгеновское излучение может иметь длину волны, меньшую, чем мягкие гамма-кванты. Но качественную картину

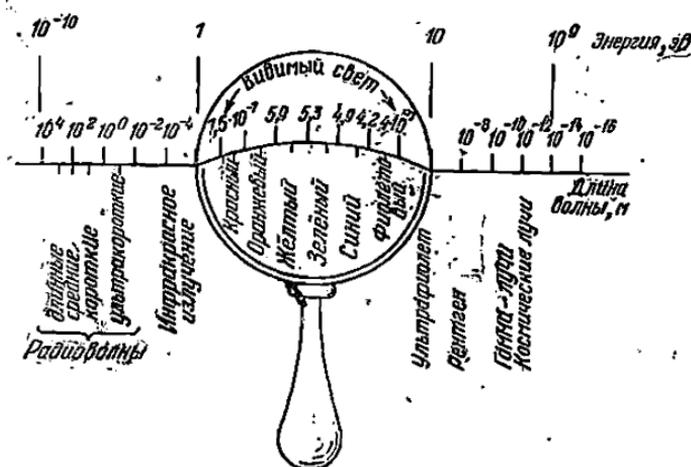


Рис. 4. Шкала электромагнитных волн.

природы электромагнитного излучения приведенная шкала дает. Что же касается видимого света, то он занимает ничтожную долю полного диапазона, так что для искусственного увеличения масштаба пришлось в этом месте шкалы нарисовать лупу.

Гравитация отвечает за поведение космических объектов, это ее царство. Когда же мы проникаем в глубь вещества, то на молекулярном и атомном уровнях безраздельно властвуют электромагнитные силы.

Классическая механика в сочетании с классической теорией электромагнетизма не сумела описать атомных явлений. С этой задачей справилась квантовая механика, созданная в начале нашего века.

Уравнения электромагнетизма также подверглись квантовой переработке; была создана теория квантованных полей. Но как бы ни росло здание — фундаментом его оставались уравнения Максвелла. Выдающийся американ-

ский физик, лауреат Нобелевской премии за работы в области квантовой теории поля Р. Фейнман писал:

«В истории человечества (если посмотреть на нее, скажем, через десять тысяч лет) самым знаменательным событием XIX столетия, несомненно, будет открытие Максвеллом законов электродинамики. На фоне этого важного научного открытия гражданская война в Америке в том же десятилетии будет выглядеть мелким провинциальным происшествием».

### 3.2. Открытие электрона

Когда Максвелл писал свои уравнения, природа электричества еще представлялась загадочной. Ничего не было известно о наименьшем заряде и о его носителях — элементарных частицах. Сам Максвелл использовал в качестве одной из моделей представление об упругой жидкости, целиком заполняющей пространство. Такую жидкость называли эфиром и с ее перемещением связывали все электрические и магнитные явления. Однако форма уравнений не зависела от выбора модели. Они не менялись в том случае, если бы оказалось, что заряд переносится отдельными частицами, как это предполагал Фарадей на основании своих опытов по электролизу. Решение вопроса о природе электричества пришло тогда, когда была открыта первая элементарная частица — электрон.

Конец девятнадцатого века поразителен своими открытиями в области физики. Каждый год перед учеными возникают новые области, огромные размеры которых будут поняты значительно позже.

1895 г. — Вильгельм Конрад Рентген открывает «х-лучи» (теперь их называют рентгеновскими лучами).

1896 г. — профессор химии в Париже Анри Беккерель открывает радиоактивность.

1897 г. — Дж. Дж. Томсон находит решающие экспериментальные доказательства существования электрона.

И, чтобы не обидеть наступающий двадцатый век, 14 декабря 1900 г., делая доклад на заседании Немецкого физического общества, Макс Планк впервые вводит в физику понятие «квант».

Дж. Дж. Томсон был профессором Кавендишской лаборатории. Третьим по счету со дня ее основания, после

Максвелла и Рэлея, внесшего огромный вклад в изучение колебательных процессов. А четвертым профессором стал Эрнест Резерфорд — физик, выдающийся даже на фоне своих великих предшественников.

Опытам Томсона предшествовала почти сорокалетняя работа физиков разных стран по изучению катодных лучей, возникающих при электрическом разряде в разреженных газах. Мы не будем касаться истории этих работ и рассмотрим ситуацию, которая сложилась в 1894 г., когда Томсон приступил к своим экспериментам.

Она выглядела так:

1. Если через разреженный газ (его давление в ряде экспериментов составляло  $10^{-5}$  часть атмосферного), помещенный в стеклянную запаянную трубку с введенными в нее двумя электродами, пропускать ток, то отрицательный электрод (катод) испускает лучи, под действием которых стекло вокруг положительного электрода (анода) светится зеленоватым светом.

2. Физики научились довольно свободно обращаться с этими лучами — пропускать их через щели, изгибать трубки так, что светящееся пятно попадало на определенную стенку и т. п. Эти опыты доказали, что катодные лучи распространяются прямолинейно.

3. Лучи отклонялись магнитным полем так, как если бы они несли отрицательный заряд. В то же время в электрическом поле они, по-видимому, не отклонялись.

4. Свойства лучей не зависят от материала катода. Лучи испускаются перпендикулярно к катоду, так что если сделать его в форме чаши, их можно сфокусировать. Сфокусированный пучок лучей нагревает до красного каления металлическую фольгу, введенную в трубку.

Для объяснения природы этого явления выдвигались различные гипотезы, две из которых получили наибольшее признание.

Крукс, Шустер и ряд других исследователей, в основном работавших в Англии, предполагали, что катодные лучи — поток молекул, столкнувшихся с катодом и зарядившихся от него отрицательным электричеством. После такой зарядки они должны отталкиваться от катода и лететь, постепенно разгоняясь, к аноду.

Высказывалась также точка зрения, что лучи — это заряженные осколки молекул газа. Положительные осколки захватываются катодом, отрицательные — летят к аноду. Было введено специальное название для этих

«атомов отрицательного электричества», их называли — электронами (Стоней, 1891 г.).

Немецкие ученые во главе с Г. Герцем считали, что катодные лучи — это новый вид электромагнитных волн, отклоняющихся в магнитном поле (в отличие от обычного света). Они подкрепляли свои доводы рядом экспериментов, из которых самый убедительный был связан с прохождением катодных лучей через тонкие металлические фольги. Это исключалось для молекул или атомов, но могло иметь место для электромагнитного излучения.

Томсон начал свои эксперименты в момент, когда грома противоречивой информации, казалось, требовала детальной проверки и осмысления. Однако ученому потребовалось менее трех лет, чтобы рядом четких и целенаправленных опытов решить спорные вопросы и обосновать поразительный вывод о существовании в каждом из атомов легких заряженных частиц. Сейчас, читая их описание, невольно думаешь, что Томсон знал окончательный результат.

Первый эксперимент был поставлен в 1894 г. В нем определялась скорость распространения катодных лучей и она получилась несравненно меньше скорости света,  $v = 2 \cdot 10^5$  м/с. Это говорило в пользу корпускулярной теории и подготовило почву для следующих работ. (Позже, правда, выяснилось, что численная величина скорости в этом опыте занижена. Ошибку обнаружил через два года сам автор, но причины ее определить не смог.)

Перейдем теперь к исследованиям 1896—97 гг., которые и стали решающим доказательством существования первой из элементарных частиц. Мы остановимся только на одном из серии экспериментов. Прежде всего в нем обнаружился тот факт, что электрическое поле все-таки отклоняет катодные лучи. Просто в более ранних опытах Герца использовались недостаточно сильные поля и недостаточно высокие разрежения. В эксперименте Томсона применялось и магнитное поле. Поэтому для описания опыта необходимо сначала рассмотреть, как движутся в этих полях заряды.

На заряд  $q$ , летящий со скоростью  $v$  в электрическом поле  $E$ , действует сила

$$F_{эл} = qE, \quad (11)$$

а в магнитном поле  $B$  — сила

$$F_{м} = q [v, B]. \quad (12)$$

Выражение  $[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$  носит название векторного произведения векторов  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$  и его надо понимать следующим образом: модуль  $F_M$  равен произведению модулей векторов  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$  на синус угла между ними:

$$|F_M| = q |\mathbf{v}| \cdot |\mathbf{B}| \sin(\widehat{\mathbf{v}, \mathbf{B}}),$$

а направление  $\mathbf{F}$  перпендикулярно к плоскости, в которой лежат  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$ , и находится по правилу левой руки.

Силу  $F_M$  часто называют силой Лоренца.

Рассмотрим теперь, к чему приводит воздействие этих полей.

Начнем с задачи (очень известной), когда заряд  $q$ , имеющий массу  $m$  и скорость  $v_0$ , влетает в промежуток между двух пластин, заряженных до потенциала  $u$ . Длина пластин  $l$ . Поле внутри — однородно, а крайними эффектами мы пренебрегаем. (Это значит, что расстояние между пластинами  $d$  должно быть много меньше  $l$ .) В начальный момент  $v_0 \parallel l$ .

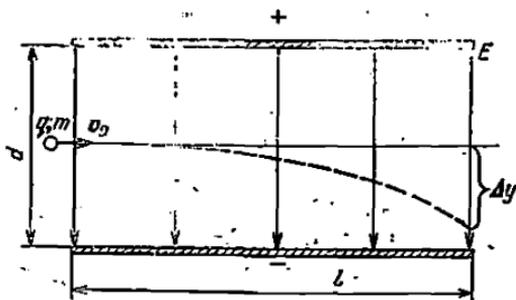


Рис. 5. Движение заряда в однородном электрическом поле.

Найдем отклонение заряда  $\Delta y$  (рис. 5). Время движения в поле  $t = l/v_0$ . Смещение  $\Delta y = \frac{1}{2} at^2$ , где  $a = F/m = = qE/m = qu/md$ . Отсюда

$$\Delta y = \frac{qu l^2}{2m d v_0^2}. \quad (13)$$

Если известны  $\Delta y$ ,  $u$ ,  $d$ ,  $l$  и определена скорость заряда  $v$ , можно определить отношение  $q/m$ .

Для магнитного поля также рассмотрим простой случай, когда заряд влетает в однородное поле  $\mathbf{B}$  и  $v_0 \perp \mathbf{B}$ . Тогда  $F_M = qv_0 B$  и эта сила заставляет заряд двигаться по окружности, радиус которой находится из

уравнения  $F_m = F_c$  (центробежная сила):

$$\frac{mv_0^2}{R} = qv_0B, \quad R = \frac{m}{q} \frac{v_0}{B} \quad (14)$$

Измерение радиуса поворота опять дает информацию о  $q/m$ , когда известна скорость частицы.

Представим себе теперь, что частица попадает во взаимно перпендикулярные поля  $E$  и  $B$ , так что электрическая и магнитная силы действуют на нее в противоположных направлениях.

Тогда подбором полей можно добиться того, что в области, где они скрещиваются,  $|F_m| = |F_{эл}|$  и заряд не отклоняется:

$$qE = qvB, \quad v = E/B, \quad (15)$$

т. е. можно определить скорость частицы, а потом и отношение  $e/m$ .

Этим воспользовался Томсон в одном из экспериментов. Пучок катодных лучей проходил между пластинами и падал на шкалу, нанесенную на стенку колбы (рис. 6).

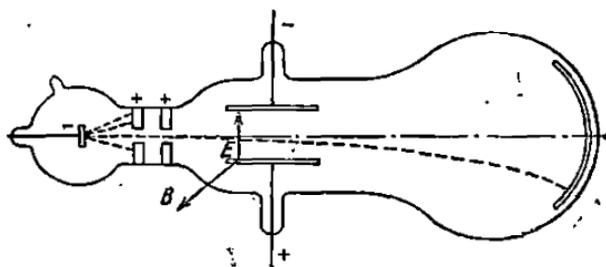


Рис. 6. Катодная трубка, использовавшаяся в опытах Дж. Дж. Томсона.

Можно было воздействовать на него электрическим полем  $E$  и перпендикулярным к нему магнитным  $B$ . В отсутствие полей замечалось деление шкалы, на которое падали лучи (нулевое деление). Затем включалось магнитное поле и по смещению находился радиус  $R$  (см. (14)). Подбирая потенциал  $U$  между пластинами так, чтобы пучок снова попал на нулевое деление, можно найти скорость частиц  $v$  (см. (15)). Наконец, решая совместно уравнения (14) и (15), Томсон определил величину  $q/m$  (мы, конечно, описываем лишь идею эксперимента, не касаясь многих деталей, учет которых был необходим для получения результата).

Отношение заряда к массе оказалось равным  $\sim 10^{11}$  Кл/кг, близкое значение было получено Томсоном в других опытах.

В своей статье, опубликованной в журнале «Philosophical Magazine» в 1897 г., Томсон сравнивает полученную величину отношения с  $q/m = 10^8$  Кл/кг для самого легкого из известных тогда атомных объектов — иона водорода. Томсон пишет:

«Эта разница может быть связана с малой массой частиц катодных лучей  $m$  или с большой величиной заряда или одновременно и с тем, и с другим». Дальше на основании опытов по прохождению катодных лучей через фольги металлов он делает вывод, что частицы должны обладать именно малой массой (малыми размерами). Итак: «катодные лучи представляют собой новое состояние вещества, существенно отличное от обычного газообразного состояния».

В дальнейшем, в серии опытов 1899 г., Томсон доказывает, что частицы, выбиваемые ультрафиолетовыми лучами из металлов (фотоэффект) и испускаемые раскаленными металлами (термоэлектронная эмиссия), имеют то же отношение  $e/m$ , что и катодные лучи. Это подтверждают и другие физики. Итак, следует вывод, что *малые отрицательно заряженные частицы являются составной частью любого атома, который может терять их при определенных условиях*. Для названия их пригодилось придуманное ранее слово — электрон.

Проходят годы, накапливается экспериментальный материал и в гораздо более точных экспериментах определяется отношение  $q/m$  для электрона и сама величина его заряда, обозначаемого буквой  $e$  (electron). Сейчас в таблицах приводятся значения

$$e = -1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, \quad m = 9,1095 \cdot 10^{31} \text{ кг}$$

и, соответственно,  $e/m = 1,7588 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

### 3.3. Закон сохранения заряда

Какие бы превращения ни происходили в системе элементарных частиц, какие бы виды сил ни действовали, ее полный заряд остается неизменным. В отличие от массы, он не зависит от скорости и системы отсчета. Этот закон природы носит название *закона сохранения электрического заряда* (ЗСЗ). Он, как и все законы сохра-

нения, связан с определенной симметрией — симметрией уравнений электродинамики.

В прямой зависимости от сохранения заряда находится и вопрос о стабильности электрона. Это самая легкая из известных заряженных частиц, но она могла бы распадаться на гамма-кванты, что запрещено ЗСЗ. Так вот, согласно последним данным, время жизни \*) электрона превышает  $10^{22}$  лет.

### 3.4. Атом Томсона

После открытия электрона Томсон предложил модель атома. По словам его маленького сына (впоследствии ставшего также знаменитым ученым), эта модель напоминала пудинг с изюмом. Изюм — это электроны, плавающие в положительно заряженной жидкости, которая и играла роль теста. В целом атом должен был быть нейтральным. Модель обладала как многими преимуществами, так и многими недостатками. Она, например, остроумно решала проблему излучения атомом электромагнитных волн. Для того чтобы электрон начал колебаться и излучать, надо чтобы при его смещении из положения равновесия на частицу действовала возвращающая сила, пропорциональная величине смещения, подобная силе упругости растянутой пружины. Но как этого добиться? Обычные кулоновские силы зависят от расстояния как  $1/r^2$ . Тут и понадобился равномерно заряженный жидкий шар, в котором (это будет показано при решении задач) смещение из центра вызывает появление возвращающей силы, пропорциональной смещению.

Самым крупным недостатком стала совершенно неясная природа заряженной жидкости. Существовали и еще всякие трудности, так что, по воспоминаниям современников, эта модель вызвала весьма сдержанный энтузиазм даже у самого автора.

### 3.5. Радиоактивность

Итак, чтобы разгадать тайну атома, еще недостаточно знать о существовании электрона. Надо найти способ, найти инструмент, с помощью которого можно было бы проникать внутрь атома, как бы «зондировать»

\*) Время жизни — время, через которое с вероятностью  $\approx 0,63$  электрон должен был бы распасться.

его. Физики получили в свои руки такой инструмент после открытия радиоактивности. Вот так выглядели первые шаги в этой новой области:

1896 г. — Французский ученый Анри Беккерель открывает необычный вид излучения. Оно испускается солями урана и засвечивает фотопластинку сквозь черную бумагу. Такое излучение вскоре получило название *естественной* (природной) *радиоактивности*.

Самоотверженный труд двух других французских ученых, супругов Марии и Пьера Кюри, позволил расширить список радиоактивных элементов. К урану прибавились торий, полоний, радий. Параллельно с открытием новых источников естественной радиоактивности шло исследование природы самого излучения (Беккерель, П. и М. Кюри, Резерфорд, Виллард и др.).

Ученые заметили, что «лучи Беккереля» не однородны. Они состояли из трех видов излучения и эти виды стали обозначать первыми буквами греческого алфавита.

$\alpha$ -лучи. Они слабо отклоняются магнитным полем, но зато сильно поглощаются веществом. Например, листок бумаги совершенно непрозрачен для них.

$\beta$ -лучи. Сильнее отклоняются магнитным полем, но зато обладают и большей проникающей способностью. Для их остановки потребовалась бы стопка бумаги.

$\gamma$ -лучи. Это — самое проникающее из всех видов излучения. Магнитное поле не производит на него «никакого впечатления».

Уже в первое десятилетие после открытия Беккереля физикам удалось выяснить природу каждого из этих видов излучения. Так, оказалось, что  $\beta$ -лучи — это быстрые электроны,  $\gamma$  — электромагнитные волны высокой частоты, а в 1909 г. Резерфорд и Ройдс окончательно доказали, что  $\alpha$ -излучение представляет собой поток атомов гелия, потерявших два электрона (дважды ионизированный гелий). Наконец, в первые годы двадцатого века Э. Резерфорд и Ф. Содди создали теорию радиоактивных превращений. Она исходила из того факта, что в природе существуют неустойчивые атомы, которые распадаются, испуская различные виды излучения —  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Распадаются, пока не перейдут в устойчивое состояние.

Если в начальный момент было  $N_0$  атомов, способных распадаться (радиоактивных), то по прошествии времени  $t$  их останется

$$N = N_0 e^{-t/\tau}. \quad (16)$$

В этой формуле  $e$  — основание натуральных логарифмов, число, равное 2,718..., а  $\tau$  — время жизни радиоактивного ядра. Если мы будем наблюдать за ядрами в течение времени  $t$ , то по закону радиоактивного распада (16) их останется

$$N = N_0 e^{-t/\tau} = \frac{N_0}{2,718^{t/\tau}},$$

т. е. 37% начального числа. Остальные 63% распадутся.

Закон радиоактивного распада — один из основополагающих в атомной и ядерной физике \*).

На рис. 7 приведена кривая радиоактивного распада свободного нейтрона. Если в какой-то момент времени

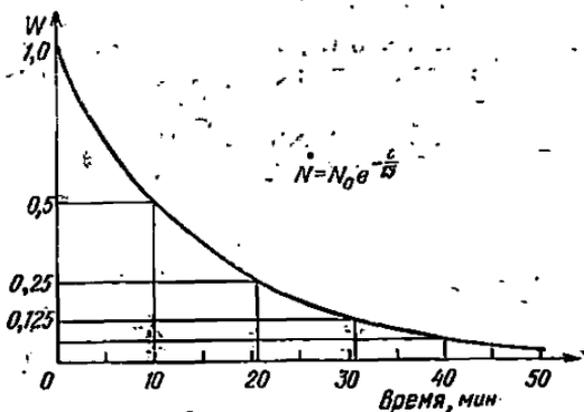


Рис. 7. Закон радиоактивного распада. Распад свободного нейтрона. По оси ординат отложена вероятность обнаружить нераспавшийся свободный нейтрон через время  $t$ .

образовался такой нейтрон, то через 15 минут (время его жизни) с вероятностью 0,63 он распадется.

История исследования радиоактивности на протяжении первой трети нашего века неотделима от имени Резерфорда. Вы смогли убедиться в этом по самому короткому перечню открытий, приведенному на предыдущей странице.

\* ) В 1931 г. Резерфорд за свои научные заслуги был пожалован званием лорда. На гербе лорда Резерфорда оф Нельсон изображены две скрещивающиеся кривые радиоактивного распада (экспоненты), пересекающие поле геральдического щита.

Ученый продолжил этот список. Через три года после того, как Резерфорд был удостоен Нобелевской премии «За исследования по распаду элементов и химии радиоактивных веществ» (1908 г.), в журнале «Philosophical magazine» была опубликована его работа об открытии атомного ядра и о новой модели атома.

### 3.6. Модель атома Резерфорда

Эта модель основывалась на экспериментах двух его сотрудников — Гейгера и Марсдена. Описанию этих опытов посвящены многие книги, они приводятся на страницах учебников. Поэтому мы будем предельно кратки и в конце предоставим слово самому Резерфорду.

Гейгер и Марсден изучали рассеяние альфа-частиц тонкой золотой фольгой. Огромное большинство частиц, пролетая через фольгу, отклонялось на малые углы, но были и исключения. Примерно одна частица на восемь тысяч отбрасывалась вообще назад. Резерфорд, ознакомившись с этими результатами, представил себе следующую картину происходящего процесса. Вещество состоит в основном из пустоты. Вокруг маленького положительного ядра (маленького, но тяжелого, поскольку вся масса атома сосредоточена в нем), как планеты вокруг Солнца, вращаются электроны. Тогда мало вероятно, что альфа-частица, проходящая через вещество, столкнется с ядром. А соударения с легкими электронами не смогут заметно искривить ее путь. Но уж если произошло столкновение с ядром, то частица рассеется на большой угол, возможно, что и отлетит назад.

Резерфорд был далеко не первым из тех, кто предлагал планетарную модель атома. До него англичанин Дж. Стони, француз Ж. Перрен, японец Х. Нагаока и еще несколько ученых высказывали такие же идеи. Но он был первым, кто на основании экспериментов рассчитал и доказал, что вся основная масса вещества сосредоточена в компактных и тяжелых ядрах.

Резерфорд сделал еще один очень смелый шаг — можно сказать, шаг пророка.

Согласно классической электродинамике электроны, движущиеся по окружности (или по эллипсу), должны излучать электромагнитные волны, так как они имеют центростремительное ускорение.

Итак, электрон теряет энергию и рано или поздно упадет на ядро.

Резерфорд это прекрасно знал, но тем не менее был уверен в своей модели. В опубликованной статье он отодвинул объяснение вопроса об устойчивости атома на будущее. И оказался прав. Уже наступала эра квантовой механики.

Последний раз выступая перед широкой аудиторией в 1936 г. (за год до смерти), Резерфорд вспоминал:

«Помню, что ко мне пришел страшно возбужденный Гейгер и сказал: «Нам удалось наблюдать  $\alpha$ -частицы, возвращающиеся назад». Это было самым невероятным событием, которое мне пришлось пережить. Это было почти столь же невероятно, как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в листок папиросной бумаги, и он вернулся бы назад и угодил бы в вас. Поразмыслив, я понял, что это обратное рассеяние должно быть результатом однократного столкновения, а когда я произвел расчеты, то увидел, что невозможно получить величину того же порядка, разве что вы рассматриваете систему, в которой большая часть массы атома сконцентрирована в малом ядре. Вот именно тогда у меня родилось представление об атоме с малым массивным центром, несущим заряд. Я математически вычислил, какому закону должно подчиняться рассеяние, и нашел, что число частиц, рассеивающихся под данным углом, должно быть пропорционально толщине рассеивающей фольги, квадрату заряда ядра и обратно пропорционально четвертой степени скорости. Этот вывод в дальнейшем был проверен Гейгером и Марсденом в серии великолепных экспериментов...»

Выдвигая теорию ядерного строения атома, я вполне отдавал себе отчет в том, что согласно классической теории электроны должны падать на ядро, а Бор постулировал, что по некоторым неизвестным причинам этого не происходит, и на основании такого предположения он сумел объяснить происхождение спектров. Применяя вполне разумные допущения, он шаг за шагом решил вопрос о расположении электронов во всех атомах периодической таблицы... В результате дальнейших усовершенствований, главным образом внесенных самим Бором, и видоизменений, произведенных Гайзенбергом, Шредингером и Дираком, изменилась вся математическая теория и были введены идеи квантовой механики».

### 3.7. Квантовый атом

Итак, мы подошли, пожалуй, к самому трудному в нашей книге — к некоторым понятиям квантовой механики. Рассказывая о частицах и их регистрации, без таких представлений не обойтись. С другой стороны, сколько-нибудь подробно, даже на качественном уровне, изложить принципы квантовой теории здесь невозможно.

Придется избрать путь «веры», либо обратиться к другим популярным и специальным книгам, посвященным этому вопросу.

Многое из того, что мы знаем в классической механике, становится неверным в микромире.

Но есть и привычные понятия, на которые можно ориентироваться. В первую очередь это законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда. Они опираются на общие свойства пространства и времени, не меняющиеся вплоть до самых малых из изученных областей.

Поведение электронов в атоме резко отличается от того, что могла бы предсказать классическая физика. Начнем с наиболее простой из атомных систем — атома водорода, состоящего из одного электрона и положительно заряженного ядра. Для этого ядра Резерфордом был придуман специальный термин — «протон», от греческого слова «протос» — первородный. Он родился после того, как в серии экспериментов (1919 г.) Резерфорд и его сотрудники расщепили атомное ядро. В результате они пришли к выводу, что *протоны являются составной частью ядер любого элемента* (строение атомного ядра мы будем обсуждать в следующих главах).

Протон (обозначают его символом  $p$ ) в 1836 раз тяжелее электрона, его масса составляет  $1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг, а заряд равен  $+e$ , так что между двумя частицами действует сила электрического притяжения, а атом в целом электрически нейтрален. Сейчас установлено, что абсолютная величина зарядов электрона и протона совпадает вплоть до 20-го знака!

Рассмотрим сначала классическое описание этой системы, которая по своим характеристикам полностью соответствует задаче двух тел, разобранный в конце второй главы. При полной энергии  $-E_0 < 0$  (см. рис. 3) электрон не может отойти от ядра на расстояние, большее  $r_2$ , и система является связанной. Чтобы ионизировать атом, находя-

щийся в таком состоянии, — т. е. оторвать от него электрон, необходимо сообщить ему дополнительную энергию  $+E_0$ . Устойчивая круговая орбита электрона осуществляется при  $r = r_0$ . И все было бы хорошо, но законы классической электродинамики предсказывают, что электрон очень быстро потеряет свою энергию и свалится на протон. В природе же ничего подобного не происходит.

А что говорит квантовая механика? По сравнению с классической теорией она ограничивает значения различных физических величин. Так, полная энергия  $E$  атома водорода может принимать не любое отрицательное значение, а вполне определенный ряд величин, которые носят название энергетических уровней атома:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ эВ}^*), \quad (17).$$

$n$  — пробегает натуральный ряд чисел: 1, 2, 3, ... Из формулы видно, что с ростом  $n$  расстояние между уровнями уменьшается и при достаточно большом  $n$  они сливаются в непрерывный спектр. (При этом система уже не находится в связанном состоянии, так как  $E = 0$ .)

Состояние с  $n = 1$ ,  $E = -13,6$  эВ, когда атом водорода находится на самом нижнем энергетическом уровне, носит название основного состояния. В случае, когда атом получает извне некоторое количество энергии, например, попадает в электромагнитное поле, становится возможным переход электрона на один из более высоких уровней. Тогда говорят о возбужденном состоянии атома. Возвращение его в основное состояние происходит за время  $\sim 10^{-8}$  с и сопровождается излучением электромагнитных волн.

И вот мы пришли к понятию *квант*, давшего имя новой теории. Излучение, которое испускается или поглощается атомом при переходах между его состояниями с энергией

\*) Придется привыкнуть к новой единице измерения энергии в мире элементарных частиц, которая называется электрон-вольт (эВ). Один электрон-вольт равен энергии, приобретаемой частицей с зарядом  $e$  при прохождении ею разности потенциалов в один вольт. Теперь несколько соотношений:

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ эрг} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж},$$

$$1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ Дж},$$

$$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж},$$

$$1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}.$$

$E_i$  и  $E_k$  имеет строго определенную частоту  $\nu$  и энергию  $h\nu = E_i - E_k$  ( $h$  — постоянная Планка, равная  $6,6 \times 10^{-34}$  Дж·с или  $4,1 \cdot 10^{-15}$  эВ·с). Оно называется квантом электромагнитного излучения или фотоном\*).

Квант, который может излучить атом водорода при переходе из состояния с  $E = 0$  в основное состояние, имеет энергию 13,6 эВ и лежит далеко за границей види-

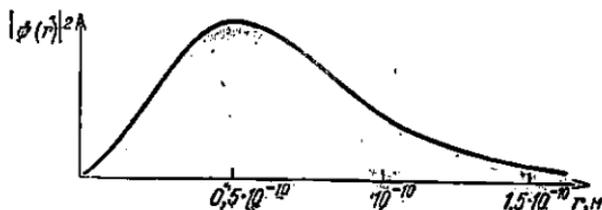


Рис. 8. Положения электрона в атоме водорода (основное состояние). По оси ординат отложена вероятность нахождения электрона на расстоянии  $r$  от ядра.

мого света. При переходе между возбужденными уровнями энергия фотона (в эВ)

$$h\nu = 13,6 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

где  $n$  — квантовое число нижнего, а  $m$  — верхнего уровня. Например, для  $n = 2$  и  $m = 4$  квант  $h\nu = 2,55$  эВ соответствует границе между зеленым и синим цветом. Согласно квантовой механике атом излучает лишь в момент перехода, и это снимает вопрос о непрерывном излучении и падении электрона на ядро.

Что касается электронных орбит, то положение электрона внутри атома описывается волновой функцией  $\psi(r)$  (она может быть комплексной). Физический смысл имеет не сама функция  $\psi$ , а квадрат ее модуля  $|\psi(r)|^2$ , который равен вероятности обнаружить электрон на расстоянии  $r$  от ядра. На рис. 8 приведен график  $|\psi(r)|^2$  для основного состояния атома водорода. Из этого рисунка видно, что наиболее вероятно найти электрон на расстоянии  $0,5 \cdot 10^{-10}$  м. В то же время он может находиться и на расстоянии  $r = 2 \cdot 10^{-10}$  м и дальше, но уже с малой вероятностью. Классическое описание электрона как шарика, вращающегося по орбите вокруг ядра, не соответствует природе атомных объектов. Под размерами атома

\* ) Импульс фотона  $p = E/c = h\nu/c$ .

следует понимать область, в которой с большей вероятностью находится электрон. Видно, что ее радиус составляет  $10^{-10}$  м. В то же время радиус ядра водорода — протона — на пять порядков меньше.

Для объяснения строения более сложных атомов, со многими электронами, квантовая механика использует совершенно особую характеристику элементарных частиц, которая носит название «спин» (to spin — по-английски значит прять, вертеть, веретено). Спин — чисто квантовая характеристика, заключающаяся в том, что у любой элементарной частицы есть внутренний момент импульса. У электрона и протона он равен  $s = \frac{1}{2} \hbar$  ( $\hbar = h/2\pi = 6,5 \cdot 10^{-16}$  эВ·с). У ряда других частиц спин выражается в целых долях  $\hbar$  и, в частности, может быть равным нулю. Частицы с полудельным спином носят название «фермионы», Они названы так в честь великого итальянского физика Энрико Ферми. Остальные частицы составляют семейство «бозонов»<sup>\*</sup>). Итак, электрон обладает спином и это свойство присуще ему так же, как заряд и масса покоя.

С механическим моментом импульса связан и магнитный момент. Частица представляет собой маленький магнетик, ориентирующийся вдоль силовых линий, если на нее действует внешнее магнитное поле.

Если бы не полудельный спин, то в сложном атоме все  $Z$  электронов (их число равно атомному номеру элемента) находились на одном энергетическом уровне — самом низком. Для фермионов такое поведение запрещено принципом Паули. Он гласит: *Невозможно, чтобы две одинаковые ферми-частицы находились в одном и том же состоянии, т. е. имели одинаковую энергию, направление спина и т. д.* Поэтому, если у атома гелия ( $Z = 2$ ) оба электрона еще могут находиться на самом нижнем энергетическом уровне, так как их спины направлены в противоположные стороны, то уже у третьего элемента периодической таблицы, лития, это невозможно. Один из электронов должен занимать следующий уровень.

Мы не будем останавливаться на правилах заполнения энергетических уровней элементов, считая, что читатель знаком с ними из школьного курса химии. Отметим, что излучение атомов в видимой области (см. рис. 4) определяется переходами электронов между верхними возбужден-

<sup>\*</sup>) Ш. Бозе — индийский физик, показавший, что световые кванты — «бозе»-частицы. В дальнейшем (1924 г.) его работы были обобщены А. Эйнштейном.

ными уровнями, а для испускания рентгеновского излучения необходимо, чтобы вакансия для электрона образовалась на одном из нижних уровней, на так называемой внутренней оболочке атома.

В следующей главе мы сможем перейти непосредственно к тем «следам», которые оставляют в веществе заряженные частицы.

### 3.8. Вопросы и задачи

6. Если в общем случае закон сохранения энергии связан с однородностью времени, то для ряда частных случаев он следует из уравнений движения. Рассмотрим пример из электростатики. Пусть частица с массой  $m$  и зарядом  $q$  движется вдоль оси  $x$  (одномерное движение) в поле, потенциал которого  $\Phi(x)$ . За время  $\Delta t$  она сместится на расстояние  $\Delta x$  и попадет в поле  $E = -\Delta\Phi/\Delta x$ . Скорость частицы также изменится на  $\Delta v$ . Теперь запишем уравнение ее движения:

$$m \frac{\Delta v}{\Delta t} = -q \frac{\Delta\Phi}{\Delta x} \quad (ma = qE). \quad (18)$$

Необходимо доказать, что из уравнения (18) следует, что полная энергия частицы  $E = U + \Pi$  сохраняется.

7. Покажите, что интенсивность излучения заряда, который колеблется по закону  $x = x_0 \sin \omega t$ , пропорциональна четвертой степени частоты колебаний  $\omega$ .

8. Теперь известно, что два ученых независимо открыли интересное явление: электрическое поле внутри равномерно заряженной сферы равно нулю. Один из них — американец Бенджамин Франклин сделал это за 18 лет до появления закона Кулона. Второй — англичанин Генри Кавендиш — несколько позже, но и он на 12 лет опередил опыты французского инженера.

Докажите, что такое свойство электрического поля есть прямое следствие того, что сила взаимодействия зарядов убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между ними, т. е. подчиняется закону Кулона (есть интересные причины, по которым закон носит имя Франклина или Кавендиша; познакомиться с ними — также задание читателю).

9. Опираясь на доказательство задачи 8, покажите, что в модели атома Томсона на электрон, выведенный из положения равновесия (из центра положительно заряженного шара), начинает действовать возвращающая сила, пропорциональная смещению, и, следовательно, он будет колебаться и излучать (плотность положительного заряда  $\rho$  Кл/м<sup>3</sup>).

10. Используя модель атома, предложенную Резерфордом, оцените скорость вращения электрона в атоме водорода, если считать, что он вращается по окружности с радиусом  $5 \cdot 10^{-11}$  м и не падает на ядро.

11. Этот вопрос связан с использованием явления радиоактивного распада в так называемых радиоуглеродных часах.

В верхних слоях атмосферы под действием космического излучения образуется радиоактивный углерод  $^{14}\text{C}$  \*). Он распадается со временем жизни около 8 тысяч лет. Интенсивность космических лучей (и, следовательно, скорость образования  $^{14}\text{C}$ ) почти не меняется со временем. И весь углерод в природе, который участвует в процессах обмена с атмосферой, содержит радиоактивные атомы. Они находятся в составе почвы, растений, животных.

Если несколько тысяч лет назад в Древнем Египте спилили дерево и сделали из него лодку, то этот кусок дерева выключился из углеродного обмена с окружающей средой. Радиоактивные атомы в нем только распадаются, но не поступают вновь. По оставшемуся количеству радиоактивного углерода можно вычислить время, прошедшее с момента изготовления лодки.

Сделайте это, если известно, что радиоактивность углерода в растущем дереве в два раза выше, чем у материала лодки.

12. Часто для того, чтобы дать представление о спине (собственном моменте импульса) элементарных частиц, их рисуют в виде шариков, вращающихся вокруг оси. Такая картина наглядна, но приводит к абсурдным количественным результатам.

Представим себе электрон в виде вращающегося колечка (с шариком результат практически не изменится, но вычисления будут труднее) массой  $m = 9 \cdot 10^{-31}$  кг и радиусом  $r \sim 10^{-16}$  м. Какова должна быть линейная скорость вращения, чтобы обеспечить ему спин, равный  $\frac{1}{2}\hbar$ ?

## Глава 4

### СЛЕДЫ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

#### 4.1. Ионизация и возбуждение

Посмотрите на рис. 9. Он воспроизводит следы частиц, которые видны под микроскопом на фотопластинке. Существуют фотопластинки со специальной эмульсией толщиной до 1 мм (в сто раз больше, чем в обычных пластинках), чувствительные к заряженным частицам. Их сначала подвергают облучению, затем проявляют и исследователь, используя микроскоп с обычным увеличением, становится свидетелем превращений и катастроф, происходящих в микромире. То, что мы видим, — уже расшифрованная фотография и, в известной мере, историческая. Дело в том, что в 1947 г. английский физик Пауэлл с сотрудниками, рассматривая облученные пластинки, нашли следы, аналогичные тем, которые изображены на рисунке. Так была открыта одна из интересней-

\*) В природе встречаются три изотопа углерода —  $^{12}\text{C}$  (99%),  $^{13}\text{C}$  (1%) и  $^{14}\text{C}$  (10<sup>-10</sup>%). Они отличаются числом нейтронов в ядре (см. главу «Ядерные силы»).

ших элементарных частиц —  $\pi$ -мезон, о которой речь будет еще впереди.

Обратимся снова к рисунку. Видно, что следы частиц не одинаковые, одни — непрерывные линии равной толщины, другие состоят из отдельных точек. Есть интересные особенности поведения частиц в точках 1 и 2. В них траектория резко меняет свое направление, что на первый взгляд противоречит закону сохранения импульса. Можно предполагать, что в этих точках вылетели какие-то частицы, которые не оставили своих следов на пластинке и унесли часть энергии и импульса. Чтобы ответить на возникающие вопросы, необходимо разобраться в том, что происходит с веществом эмульсии (и вообще с веществом), когда через него проходит частица.

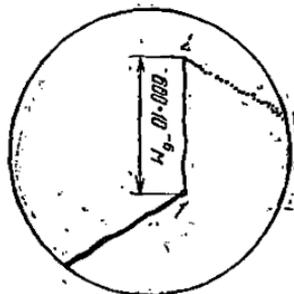


Рис. 9. Распад  $\pi$ -мезона в фотоэмульсии.

Начнем со случая, когда уже известные нам  $\alpha$ -частица или протон с энергией в несколько МэВ проходят сквозь вещество. При этом они движутся относительно медленно и успевают, проходя мимо атомов, своим электрическим полем «толкнуть» электроны и передать им часть энергии. Электрон либо переходит на более высокий энергетический уровень, либо вообще вылетает из атома. Итак, энергия тратится на возбуждение и ионизацию. Потери энергии на каждый такой акт малы по сравнению с полной энергией частицы (тяжелый шар сталкивается с легким шариком — электроном). Можно считать, что частица плавно тормозится веществом и ее траектория близка к прямой линии. Даже из такой грубой картины легко догадаться, что потери энергии —  $\Delta E$  на единице пути  $\Delta x$  тем больше, чем меньше скорость частицы и чем больше ее заряд и плотность электронов в веществе. Точная зависимость была получена Нильсом Бором и выглядит следующим образом:

$$-\frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{z^2 e^4}{m_e v^2} \cdot (nZ) F. \quad (19)$$

Здесь  $m_e$  и  $e$  — масса и заряд электрона,  $z$  — заряд частицы (в единицах заряда электрона, например, для протона

$z = 1$ , для  $\alpha$ -частицы  $z = 2$  и т. п.),  $v$  — скорость частицы.

Теперь то, что касается среды:  $n$  — число атомов в единице объема вещества, а  $Z$  — их атомный номер. Следовательно,  $nZ$  — число электронов среды в единице объема. Функция  $F$  зависит от свойств вещества и скорости частицы, но меняется довольно слабо.

Используем теперь формулу (19), чтобы сравнить потери энергии различных частиц, летящих с одной и той же начальной энергией, например,  $\mu^+$ -мезонов и протонов с энергией 10 МэВ. В качестве среды возьмем полиэтиленовую пленку толщиной всего 0,1 мм. Протоны потеряют в ней 0,5 МэВ. Так как масса протона приблизительно в 8,6 раз превышает массу  $\mu$ -мезона (последняя равна  $207 m_e$ ), то при одинаковой энергии квадрат скорости легкой частицы должен быть во столько же раз больше, чем у протона. Пренебрегая различиями в  $F$ , из формулы получим  $-(\Delta E/\Delta x)_\mu = (\Delta E/\Delta x)_p : 8,6 \approx 0,06$  МэВ. Тяжелые частицы, да еще с  $z > 1$ , очень быстро теряют свою энергию. Мы приведем сравнение пробегов в воздухе различных частиц: протон с энергией 4 МэВ  $\sim 25$  см,  $\alpha$ -частица ( $z = 2$ ) с энергией 4 МэВ  $\sim 2,5$  см, осколки деления урана ( $Z = 38$ ) с энергией 100 МэВ также 2,5 см. Разница колоссальная и она, конечно, влияет на выбор детектора для той или иной задачи, а иногда позволяет различить и природу частиц.

Ионизирующая частица разрушает атомы и в веществе появляются свободные электроны (или ионы). Оказывается, что энергия, которая затрачивается ею в газах на образование одной пары ионов, весьма слабо зависит от вида газа и сорта частицы. Так, для воздуха, азота, инертных газов она составляет 35 эВ на одну пару ионов. Альфа-частица с энергией 3,5 МэВ создаст на своем пути около  $10^5$  пар ионов, с суммарным зарядом  $\sim 10^{-14}$  кулона. Как мы увидим в дальнейшем, физики научились с большой точностью регистрировать такие заряды. Очень важно, что в полупроводниках, таких, как германий и кремний, энергия образования единицы заряда приблизительно в 10 раз меньше, чем в газах. Это определяет основные преимущества так называемых кристаллических, или полупроводниковых, счетчиков, потому что в 10 раз больший заряд можно зарегистрировать с гораздо лучшей точностью.

Теперь ненадолго вернемся к фотографическому методу регистрации. Эмульсия на фотопластинке состоит из же-

латины и кристалликов галлоидного серебра. Пролетающая частица ионизирует атомы в этих кристаллах, разрушает молекулы и создает в них скрытые центры изображения. При проявлении скрытые центры образуют черные зернышки очень маленького размера (диаметром около половины микрометра). Легкая частица на единице пути создает меньше таких зернышек, чем тяжелая той же энергии. Поэтому след  $\pi$ -мезона представляется почти сплошным, а электрона — ближе к пунктирному. К тому же в конце пути электрон, потерявший свою энергию, движется по весьма искривленной траектории, напоминающей блуждания в лабиринте. Тяжелые частицы при взаимодействии с электронами отклоняются мало. Что касается нейтральных частиц, то они, естественно, на пластинке следов не оставляют. Фотографический метод дает еще много интересной информации и о скорости частиц, и о их массе и заряде.

#### 4.2. Потери на излучение

При малых скоростях летящая частица успевает ионизировать и возбуждать атомы. Но чем быстрее она летит, тем меньше времени остается для такого взаимодействия, и процессы ионизации начинают уступать первенство другим механизмам потерь энергии. Первый, на котором мы остановимся, носит название тормозного излучения.

Физики многие годы наблюдали зеленое светящееся пятно на стекле, которое возникало под лучком катодных лучей. Но от наблюдения до понимания лежал еще длинный путь.

Ноябрьским вечером 1895 г. Вильгельм Конрад Рентген, пятидесятилетний профессор физики, обнаружил, что из зеленого пятна, кроме видимого света, исходит еще и невидимое и загадочное излучение. Оно заставляло светиться экран, покрытый солью бария, и свободно проникало сквозь картон, пачку бумаги, книгу, эбонитовую пластинку. Какие только преграды не ставил на пути этого излучения исследователь! Вот на экране появилось изображение костей руки — мяткие ткани для нового вида лучей были прозрачными. Пятьдесят дней, точнее сказать, пятьдесят суток, почти без перерыва Рентген исследовал свойства  $x$ -лучей.

Первая же статья ученого буквально обошла весь мир. Но объяснить природу загадочных лучей Рентген не смог.

Более того, великий физик до конца жизни не признавал существования электронов. А именно их торможение в стекле трубки и было причиной жестких квантов — рентгеновских лучей и более мягких — зеленого видимого света.

Частица влетает в вещество и начинает им тормозиться. Мы уже говорили о том, что заряд, движущийся с ускорением  $a$ , излучает электромагнитные волны и интенсивность их излучения пропорциональна  $a^2$ . Энергия квантов берется опять-таки за счет торможения заряда. Отсюда и название процесса — тормозное излучение.

Ускорение движения в поле ядра тем больше, чем больше заряд ядра  $Z$  и чем меньше масса частицы ( $a \sim \sim 1/M$ ). Поэтому интенсивность излучения зависит от массы, как  $1/M^2$ , и от заряда, как  $Z^2$ .

Сильнее всего излучают электроны, попавшие в тяжелое вещество, например, в свинец. Потери энергии на тормозное излучение для таких частиц, как протон, или для более тяжелых ядер необходимо учитывать только для очень быстрых частиц, прилетающих из космоса. Энергия, при которой потери на ионизацию и тормозное излучение сравниваются, носит название критической ( $E_{кр}$ ). Приведем несколько значений  $E_{кр}$  для электрона в различных средах:

воздух  $E_{кр} \approx 90$  МэВ,

алюминий  $E_{кр} \approx 50$  МэВ,

свинец  $E_{кр} \approx 7$  МэВ.

Пробег самых быстрых электронов относительно невелик, но для того чтобы точно зарегистрировать их энергию, детектор должен быть достаточно массивным, иначе кванты тормозного излучения не поглотятся в нем.

### 4.3. Излучение Вавилова — Черенкова

Следующий вид излучения быстрых заряженных частиц носит имя ученых, открывших его, — излучение Вавилова — Черенкова. Оно возникает в очень интересной физической ситуации, когда частица в веществе движется со скоростью, большей скорости света. Речь идет, конечно, о скорости света в среде  $c_{ср}$ , которая может быть в несколько раз меньше  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Но почему свет замедляется, проходя, например, через воду или стекло?

Электромагнитная волна, падая на вещество, заставляет электроны колебаться с частотой, равной частоте колебаний ее поля. Колеблющиеся электроны в свою очередь излучают электромагнитные волны, и результирующее поле в любой точке находится сложением амплитуд ото всех этих источников. Полная картина представляется таким образом, как будто энергия и импульс, переносимые волной, стали двигаться в веществе медленнее, чем в вакууме. Отношение  $c_{\text{вак}}$  и  $c_{\text{ср}}$  называется абсолютным показателем преломления  $n$ . Для стекла  $n = 1,5 \div 1,7$ . Это значит, что свет в стекле движется со скоростью  $c_{\text{ст}} = (1,7 \div 2) \cdot 10^8$  м/с и быстрая частица может его обогнать. Например, электрон, имеющий энергию около 300 КэВ, влетев в стекло, некоторое время, пока он не затормозился и не растерял свою энергию, летит со скоростью  $v > c$ . (Более детальные вычисления будут сделаны при решении задач.)

По теории Максвелла, равномерно движущийся заряд не должен излучать. Это действительно так для вакуума и для движения в веществе со скоростью  $v < c_{\text{ср}}$ . Если же  $v > c_{\text{ср}}$ , то ситуация меняется.

Заряженная частица поляризует среду вокруг себя. Она смещает электроны атома в одну сторону, а положительно заряженные ядра — в другую. Возвращаясь в исходное состояние, атом излучает электромагнитные волны. Если скорость частицы меньше  $c_{\text{ср}}$ , то поле обгоняет ее, давая сигнал атомам, что «пора пошевеливаться». А из-за того, что поляризация атомов впереди — по траектории частицы и позади — противоположная по направлению, их излучение, складываясь, гасит друг друга. Если же  $v > c_{\text{ср}}$ , то симметрия нарушается. Атомы впереди не успевают поляризоваться, и возникает излучение, распространяющееся в конусе, вершиной которого служит летящая частица.

Возникновение светового конуса — еще одна интересная особенность излучения Вавилова — Черенкова. Частица, обгоняющая свой свет, схожа с самолетом, летящим со скоростью, превышающей скорость звука в воздухе. В последнем случае возникает ударная волна, конусом распространяющаяся за самолетом. Так называемый конус Маха.

Найдем угол раствора светового конуса, воспользовавшись наглядной моделью водяных волн. Известно, что они распространяются с небольшой скоростью и хороший

пловец догоняет волну, а лодка ее перегоняет. Поэтому легко представить себе, что мы идем по берегу со скоростью  $v$ , большей скорости волны  $v_B$ , и через малые промежутки времени бросаем в спокойную воду камешки. От мест падения кругами расходятся волны (рис. 10), и их огибающая представляет собой угол величиной  $2\theta$ . За время  $t$  мы пройдем путь  $AB = v \cdot t$  и за то же время волновое возмущение из точки  $A$  достигнет точки  $C$ :  $AC = v_B \cdot t$ . Отсюда

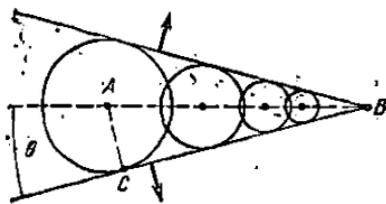


Рис. 10. Конус излучения Вавилова — Черенкова.

Мы рассмотрели случай волн на плоскости. В пространстве угол раствора светового конуса черенковского излучения  $\cos \theta = v_B / v = c / nv$ . Полагая  $v/c = \beta$ , получим окончательно

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}.$$

Видно, что при  $\beta < 1/n$  это выражение теряет смысл, поскольку косинус угла не может быть больше единицы.

Потери энергии заряженной частицы на черенковское излучение почти в тысячу раз меньше, чем ее потери на ионизацию. Тем не менее детекторы, основанные на эффекте Вавилова — Черенкова, получили широкое распространение в физике частиц высоких энергий и космических лучей.

Теперь немного истории.

Впервые это излучение, не подозревая о его природе, наблюдали Мария и Пьер Кюри, когда приготовленные бутылки с растворами препаратов радия светились голубым светом. Это было в 1900 — 1905 гг. В 1926 г. Л. Малле опубликовал статью «Люминесценция воды и органических веществ под действием гамма-лучей». Он наблюдал свечение растворов, но не смог понять их природу. Полное экспериментальное изучение и теоретическое описание эффекта Вавилова — Черенкова относится к 1934 — 1937 гг. Сергей Иванович Вавилов, выдающийся советский физик (ставший в 1945 г. президентом Академии наук СССР) предложил своему аспиранту П. А. Черенкову исследовать люминесценцию водных растворов одной из солей урана. Молекулы соли, возбуждаемые внешним ис-

точником гамма-излучения, испускали видимый свет. Молодой ученый успешно начал эксперименты и ... столкнулся с непонятным явлением. При уменьшении концентрации соли (вплоть до того, что облучалась чистая вода) он продолжал наблюдать голубое свечение. Черенков сообщил об этом своему руководителю и Вавилов очень заинтересовался необычным эффектом. Была продумана и выполнена большая программа контрольных экспериментов. Облучали воду в различных сосудах, облучали самые разные органические жидкости, вводили в растворы специальные добавки, тушащие люминесценцию, нагревали жидкости (это тоже тушит люминесценцию). Свечение не пропадало! Более того, его спектральный состав, интенсивность и ряд других свойств не менялись. Тогда Вавилов сделал два важнейших вывода:

1. Излучение не связано с люминесценцией;
2. Оно вызвано быстрыми электронами, рождающимися в столкновениях гамма-квантов с атомами вещества.

Второй из них был подтвержден опытами Черенкова с источником бета-лучей. Исследования продолжались, а в 1937 г. И. М. Франк (тоже ученик Вавилова) и И. Е. Тамм создали теорию эффекта Вавилова — Черенкова. Экспериментальные результаты с хорошей точностью совпадали с вычислениями теоретиков.

Новое явление получило признание далеко не сразу. И. М. Франк вспоминает: «Язвительные замечания по поводу того, что в ФИАНе\*) занимаются изучением никому не нужного свечения...» и «занимаются свечением какой-то грязи».

Журнал «Nature» в 1937 г. не принял для печати статью Черенкова, в которой сравнивались результаты опытов с теорией. Происходило то, о чем хорошо написал Г. Дж. Липкин (правда, в применении к эффекту Мёссбауэра). Физическое открытие последовательно проходило ряд периодов.

Первый: 1900—1925 гг. Могли бы открыть, но не открыли.

Второй: 1926—1933 гг. Открыли, но не поняли.

Третий: 1934—1937 гг. Поняли, но им не поверили.

Четвертый: 1938—1945 гг. Поверили, но не заинтересовались.

Пятый: 1946—1958 гг. У—У—У—У—У!!!

---

\*) Физический институт АН СССР им. П. Н. Лебедева.

Нам остается добавить, что в 1958 г. за «Открытие и толкование эффекта Черенкова» советским физикам П. А. Черенкову, И. М. Франку и И. Е. Тамму была присуждена Нобелевская премия по физике. Это было через семь лет после смерти С. И. Вавилова (по положению Нобелевская премия присуждается лишь прижизненно).

#### 4.4. Вопросы и задачи

13. Осколок деления оставил в фотоэмульсии след, изображенный на рис. 11, а. Определите по нему направление движения осколка. Чем объяснить сужение этого следа?

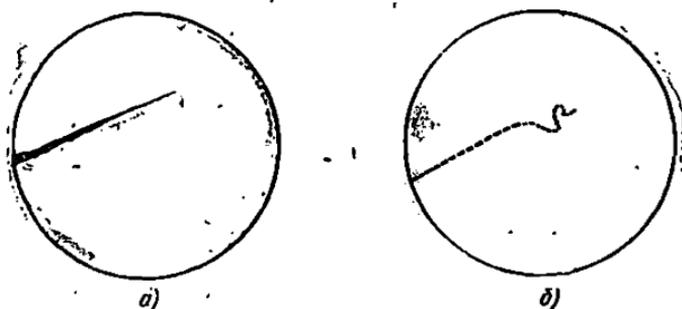


Рис. 11. Следы частиц в фотоэмульсии.

14. Теперь по рис. 11, б определите направление движения электрона в фотоэмульсии.

15. В рентгеновской трубке пучок электронов, разогнанный до больших энергий, бомбардирует пластинку из вольфрама. Экспериментаторы измерили спектр рентгеновского излучения, испускаемого электронами при торможении. Он приведен в виде графика на рис. 12. По горизонтальной оси отложена длина волны  $\lambda$

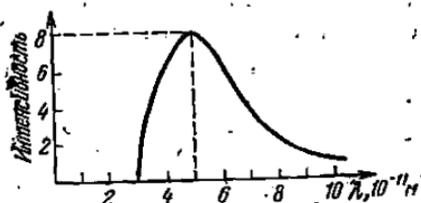


Рис. 12. Спектр тормозного рентгеновского излучения.

рентгеновских лучей в единицах  $10^{-11}$  м, по вертикальной оси — их относительная интенсивность. Найдите, какая разница потенциалов и была приложена к трубке. Почему в качестве тормозящего материала выбран вольфрам?

16. Найти, при какой минимальной энергии электронов возникает в воде эффект Вавилова — Черенкова (показатель преломления воды  $n = 1,33$ ).

## 5.1. Фотозффект и комптон-эффект

В предыдущей главе, когда мы говорили о прохождении электромагнитного излучения через вещество, то использовали волновую картину. Но если дело касается излучения очень высокой частоты (например, гамма-квантов), то классическая физика уже не может объяснить многих (и основных!) из происходящих при этом процессов. Здесь обязательно надо использовать квантовые представления и рассматривать взаимодействие с атомами и ядрами отдельных частиц света — фотонов, имеющих энергию  $h\nu$  и импульс  $h\nu/c$ .

Первый из видов такого взаимодействия носит название фотозффекта. Он заключается в том, что фотон падает на атом и полностью им поглощается. При этом вылетает электрон с энергией  $E_e$ :

$$E_e = h\nu - E_0; \quad (20)$$

$E_0$  — та энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы вырвать его из атома, энергия ионизации. Теорию фотозффекта создал Эйнштейн. В начале нашего века он сделал очень много для рождения квантовой механики. Но, грустный парадокс, — до конца своей жизни не принимал окончательных выводов этой теории.

Фотозффект не может происходить на отдельном электроде вне поля атома, так как тогда законы сохранения энергии и импульса перестают выполняться одновременно\*). Часть импульса фотона обязательно должна принять на себя атом и чем крепче электрон связан, тем легче выполняется это условие. Поэтому фотозффект с большей вероятностью происходит на электронах внутренних оболочек и на ядрах с большим  $Z$ . Вероятность фотозффекта падает с увеличением энергии фотона.

В дальнейшем нас будет интересовать также так называемый внешний фотозффект, сопровождающийся выбиванием электронов из поверхности металла. В этом случае

$$E_e = h\nu - E_{\text{вых}}, \quad (21)$$

\*) См. задачу 17.

где  $E_{\text{вых}}$  — работа выхода, т. е. работа, необходимая для того, чтобы вырвать электрон с поверхности. Величины  $E_{\text{вых}}$  для металлов невелики, так как отрываются свободные, т. е. не связанные с определенными атомами, электроны. Энергии лежат в диапазоне от 2 до 6 эВ. Таким образом, желтый свет может вырвать электрон из цезия ( $E_{\text{вых}} = 1,9$  эВ), тогда как поверхность платины ( $E_{\text{вых}} = 6,3$  эВ) необходимо освещать для этого ультрафиолетовыми лучами. Избыток импульса при внешнем фотоэффекте принимает металл как целое.

Следующий из процессов взаимодействия электромагнитного излучения с веществом носит название *комптона-эффекта*. Артур Комптон в экспериментах 1922—1923 гг. показал, что рентгеновский квант может рассеиваться на свободном электроне с изменением частоты и разность энергий  $h\nu_1 - h\nu_2$  передается электрону. Последовательное объяснение этого явления может быть сделано только при использовании корпускулярных свойств излучения. Как говорил сам Комптон, происходит игра на бильярде шариками-фотонами и шариками-электронами (кстати, термин «фотон» введен Комптоном). Правила этой «игры» следующие:

$$E_e = h\nu_1 - h\nu_2, \quad (22)$$

$$p_e = p_1 - p_2; \quad (23)$$

$p_1$  и  $p_2$  — импульсы фотона до и после рассеяния, соответственно,  $p_e$  — импульс электрона,  $E_e$  — его кинетическая энергия. Вероятность такого рассеяния уменьшается с ростом энергии кванта.

## 5.2. Соотношение неопределенности

Эффект Комптона позволяет проиллюстрировать один из самых удивительных законов микромира — соотношение неопределенности.

Мы уже сталкивались с тем, что квантовая механика иногда запрещает непрерывное изменение величины, например, энергии электрона, связанного в атоме. Но она еще и вводит ограничения на возможность одновременного точного измерения некоторых величин. В классической физике не возникало никакого сомнения, что зная точную коор-

динату частицы, в тот же момент времени можно с любой, точностью измерить и ее импульс. А квантовая механика утверждает, что это принципиально невозможно. Нельзя осуществить такой опыт, в котором ошибка в измерении импульса  $\Delta p_x$ , умноженная на ошибку в знании координаты  $\Delta x$ , была бы меньше, чем постоянная Планка:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar. \quad (24)$$

Конечно,  $\hbar$  — величина очень малая, и для окружающих нас макроскопических (больших) тел никакой роли соотношение (24) не играет. Представим себе ползущего жука, массой 1 г, скорость которого мы измерили с точностью  $\Delta v = 1$  мм/с. Тогда неопределенность в значении его импульса  $\Delta p = m\Delta v = 10^{-6}$  кг·м/с. Помешает ли это узнать точное местоположение жука? Принципиальная неопределенность в знании местоположения жука составит не менее, чем  $10^{-28}$  м, а ведь это на тринадцать порядков меньше размеров атомного ядра! А вот в мире элементарных частиц ситуация меняется и соотношение неопределенности начинает играть важную роль. Оно было сформулировано одним из создателей квантовой механики Вернером Гайзенбергом в 1927 г. Приведем отрывок из его статьи, который, по сравнению со многими последующими пересказами, выглядит много короче и проще. Гайзенберг разбирает «мысленный» эксперимент по определению координаты частицы.

«Если мы хотим уяснить, что следует понимать под словом «положение объекта», например, электрона, необходимо указать определенные эксперименты, при помощи которых намереваются определить «положение электрона»; в противном случае это не имеет смысла. Нет недостатка в таких экспериментах, в которых в принципе можно определить «положение электрона» и даже с какой угодно точностью. Например, мы освещаем электрон и рассматриваем его в микроскоп. При таком способе максимально достижимая точность определения положения в основном задается длиной волны используемого света \*). Но в принципе можно построить, например,  $\gamma$ -лучевой микроскоп

\*) Если длина волны света сравнима с размерами рассматриваемого предмета, то изображение получается нечетким из-за явления дифракции. Чем меньше предмет, тем точнее надо определить его контуры, тем меньше должно быть значение  $\lambda$  (и, соответственно, больше значение  $\nu$ ). (Прим. автора.)

и с его помощью определить положение с желаемой точностью. Однако в этом измерении существенно побочное обстоятельство — эффект Комптона ... В мгновение, когда определяется положение, иначе говоря, в мгновение, когда квант света отклоняется электроном, последний прерывно изменяет свой импульс. Это изменение тем сильнее, чем меньше длина волны используемого света, иначе говоря, чем выше точность определения положения. Поэтому в то мгновение, когда известно положение электрона, импульс может быть определен лишь с точностью до величин, соответствующих такому прерывному изменению; итак, чем точнее определяется положение, тем менее точно известен импульс, и наоборот».

Похожие соотношения существуют и для других квантовых величин. Так, неопределенность в разности энергий системы  $E_1$  и  $E_2$ , измеренных в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , связана с  $\Delta t = t_2 - t_1$  соотношением

$$\Delta(E_2 - E_1) \Delta t \geq h. \quad (25)$$

Чем меньше  $\Delta t$ , тем значительнее может быть неопределенность в энергии перехода системы между первым и вторым состояниями.

Рассмотрим такой пример. Пусть атом находится в возбужденном состоянии около  $10^{-8}$  с, после чего излучает фотон и переходит в основное состояние. Тогда неопределенность в энергии вылетевшего фотона (пусть сама его энергия равна, скажем,  $h\nu = 5$  эВ)

$$\Delta(h\nu) \geq \frac{6,5 \cdot 10^{-16} \text{ эВ} \cdot \text{с}}{10^{-8} \text{ с}} = 6,5 \cdot 10^{-8} \text{ эВ}.$$

При этом говорят, что ширина возбужденного уровня атома  $\Gamma \approx 6,5 \cdot 10^{-8}$  эВ. Очевидно, это очень малое значение по сравнению с самой энергией  $h\nu$ . Но вот с развитием ядерной физики были открыты частицы, названные *резонансами*, время жизни которых составляет  $\tau = 10^{-22} \div 10^{-23}$  с. В этом случае ширина резонанса около 100 МэВ. Эта величина уже сравнима с массой частиц (10<sup>3</sup> МэВ). Итак, из соотношения неопределенности для времени и энергии следует, что в возбужденном состоянии квантовые системы имеют не строго определенную энергию, а размытую на величину  $\Gamma \geq \hbar/\tau$ , где  $\tau$  — время жизни системы в этом состоянии.

### 5.3. Предсказание позитрона

Третий (и последний) процесс взаимодействия гамма-квантов с веществом носит странное на первый взгляд название: «рождение пар». Его обнаружение было связано с открытием позитрона — еще одной элементарной частицы. Нам придется ненадолго отвлечься, чтобы рассказать об истории этого открытия и заодно познакомить читателя с «самым оригинальным и удивительным инструментом для регистрации частиц» (слова Э. Резерфорда). Этим инструментом была «туманная камера Вильсона».

Итак, начнем с теоретического предсказания. Весьма скупой на выражения восторга Нильс Бор назвал 1925—1930 гг. «золотым веком квантовой механики». И еще он сказал: «Пришлось преодолеть многочисленные препятствия, пока цель не была достигнута, и прошло время, и как это бывает, решающий успех был достигнут самыми молодыми из нас».

В 1925 году Э. Шредингеру исполнилось 38 лет, Луи де Бройлю — 33 года, В. Паули — 25 лет, Э. Ферми — 24, В. Гайзенбергу и П. Дираку — по 23 года.

21 июля 1927 г. девятнадцатилетний (!) студент Ленинградского университета Лев Ландау публикует свою первую работу, которая потом станет обязательным параграфом в курсах квантовой механики.

Уже к 1927 году были выработаны основные принципы новой науки, создан ее математический аппарат.

Квантовая механика установила законы природы, действующие внутри атома. Однако она была пока непригодна к частицам, движущимся со скоростью, близкой к скорости света. Надо было сделать следующий шаг и объединить квантовую механику и теорию относительности. Он был сделан Дираком.

«Из-за того, что я стал писателем, не следует думать, что я никогда не стремился к какой-либо достойной деятельности». Эту шутку Вернарда Шоу вполне мог бы повторить молодой человек из Бристоля, который стремился к весьма достойной деятельности инженера-электрика, а стал автором многих «безумных идей» физики XX века. Его полное имя Поль Анриен Морис Дирак. Лишившись места в Бристоле, он приехал в Кембридж и увлекся только еще рождающейся областью физики — квантовой механикой.

Позднее Дирак говорил: «Я благодарен судьбе, что родился вовремя: будь я старше или моложе на несколько лет, мне не представились бы столь блестящие возможности. Казалось, все благоприятствовало мне...» И прежде всего исключительная одаренность — добавим мы.

И вот, в январе 1928 г. Поль Дирак вывел уравнение, описывающее поведение быстрых электронов. Из уравнения Дирака вытекало существование у электрона спина, магнитного момента; оно объясняло некоторые особенности структуры уровней энергии в атоме. Все хорошо, но уравнение допускало решения, при которых электрон мог иметь отрицательную кинетическую энергию.

Приблизительно три года шли дебаты теоретиков об этих «не физических» решениях, пока выход из сложившегося положения не нашел сам автор. Мы не можем привести здесь его рассуждения, а сообщим только окончательный вывод — согласно Дираку (1931 г.) наряду с электронами в природе должны существовать частицы, по всем своим свойствам тождественные электрону (масса, спин), но с положительным зарядом  $+e^{th}$ .

Если такая частица придет в соприкосновение с электроном, то обе они исчезнут — аннигилируют, а масса частиц, согласно соотношению Эйнштейна  $E = mc^2$ , перейдет в энергию образовавшихся гамма-квантов:

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$$

$$(0,511 \text{ МэВ} + 0,511 \text{ МэВ} \rightarrow 1,022 \text{ МэВ}).$$

Пожалуй никто, кроме Дирака (да и он не проявлял особой уверенности), не принял такого толкования отрицательных решений: Нильс Бор, Вольфганг Паули не разделяли точки зрения молодого ученого.

Но пришел 1932 год. В летописи экспериментальной физики он отмечен совершенно особо как год многих выдающихся открытий. Его называли «золотой год», «год чудес», а позднее более научно: «год информационного взрыва»<sup>\*\*</sup>). Самыми важными событиями стали: открытие нейтрона и обнаружение в космических лучах первой из античастиц — позитрона.

<sup>\*</sup>) И с противоположным знаком магнитного момента

<sup>\*\*</sup>) За экспериментальные достижения 1932 г. были присуждены четыре Нобелевских премии. Три из них — в 1934, 1935 и 1936 гг. Четвертая позднее — в 1951 г.

## 5.4. «Случайное» открытие

Часто говорят о том, что позитрон обнаружил случайно. Писать так стало почти традиционным. Действительно, Карл Андерсон, который и совершил это открытие, проводил эксперименты; «цель которых состояла в измерении энергетического спектра электронов, образующихся в атмосфере и в материалах, благодаря приходящему из космоса излучению». Ни о каких позитронах (положительных электронах, как их тогда называли) речь не шла.

Но что означает «случайное» открытие? Эрнест Резерфорд писал об этом: «Наука продвигается вперед шаг за шагом, и труд любого человека зависит от труда его предшественников. Если до вас дошел слух о внезапном, неожиданном открытии, как говорится, гром среди ясного неба, можете быть уверены, что оно созрело в результате влияния одних людей на других, и именно это взаимное влияние открывает необычайные возможности прогресса науки. Успех ученых зависит не от идей или удачи отдельного человека, а от объединенной мудрости многих тысяч людей, размышляющих над одной и той же проблемой, и каждый вносит свою небольшую лепту в великое здание знания, которое постепенно воздвигается».

Примером подтверждения этих слов может служить обнаружение позитрона. Оно было подготовлено:

- первыми исследованиями космических лучей;
- созданием камеры Вильсона;

- работами советского физика Д. В. Скобельцына

- и, конечно же, предсказанием его существования.

1932 г. (как мы увидим и дальше) был не только «годом чудес»; но и «годом исполняющихся предсказаний».

## 5.5. Космические лучи и камера Вильсона

Всем, наверное, знаком школьный прибор — электроскоп. Если его зарядить, то листочки со временем опадают и это происходит, как бы хорошо ни была изолирована подставка и каким бы герметичным ни был кожух. Напрашивается естественный вывод, что в воздухе всегда присутствуют носители заряда — ионы или ток разряжает электроскоп. Какого происхождения этих ионов?

Попытка ответить на этот вопрос сыграла важную роль в обнаружении космического излучения.

В начале нашего века, после открытия радиоактивности, положение, казалось, прояснилось. Ничтожное количество радиоактивных элементов всегда присутствует в почве, стенах здания, материалах установок и, наконец, в самих экспериментаторах. В атмосферу попадают радиоактивные газы (правда, они быстро распадаются). Это идущее отовсюду излучение и приводит к ионизации воздуха. Вместе с тем экспериментальная техника улучшалась, на смену относительно простым приборам пришли сложные — электрометры, которые могли уловить присутствие даже нескольких десятков ионов в 1 см<sup>3</sup> воздуха. Желая еще больше увеличить их чувствительность, электрометры окружали слоем свинца, поглощавшего внешнее излучение, и выдерживали несколько суток, чтобы внутри прибора распались радиоактивные газы. Тем не менее ток разрядки шел. Была высказана гипотеза о том, что через свинец проникает энергичное излучение земных пород. А поскольку начало нашего века ознаменовалось удивительными успехами в воздухоплавании, то почему бы не подняться над поверхностью Земли и тем самым не удалиться от ее излучения? Так и было сделано.

Сначала пытались использовать Эйфелеву башню (300 м), затем в 1909—1910 гг. К. Геккель поднялся на воздушном шаре на высоту около 4 км. Наиболее точные из первых измерений провел, однако, не он, а В. Гесс (5 км). Согласно его данным ионизационный ток вначале уменьшался, а затем быстро возрастал. На высоте 5 км он был уже в три раза больше, чем у поверхности Земли. Гесс высказал предположение, что существует проникающее, ионизирующее излучение, идущее сверху и ослабляемое атмосферой.

В 1922—1926 гг. работы, которые велись группой американских физиков под руководством Р. Милликена на воздушных шарах-зондах (они поднимались до 15 км), в горных местностях, под водой, позволили точно установить, что на Землю из мирового пространства падает неизвестное излучение. Милликен назвал его космическим. Для того чтобы понять природу этого излучения, ионизационный метод уже не годился — он регистрировал следствие (ионизацию), которое могло быть вызвано самыми разными причинами. Чтобы продвигаться дальше в изучении космических лучей, физикам понадобилось

обратиться к уже существовавшему в то время прибору — туманной камере Вильсона.

Представьте себе, как поток влажного воздуха, нагретого землей, поднимается вверх. В более высоких слоях атмосферы воздушные массы расширяются и одновременно охлаждаются. Теперь водяной пар находится уже в пересыщенном состоянии и начинает собираться в капли влаги. Мы говорим: «небо затянулось пеленой тумана». Процесс роста капель в пересыщенном паре оказался непростым. Так, ученые выяснили, что для образования тумана необходимы «центры конденсации» — чаще всего мелкие частицы пыли. Иначе, при некоторых условиях, пар значительное время остается пересыщенным.

Занимался этими вопросами и Чарльз Вильсон. Позднее он рассказывал друзьям, что еще юношей любовался красивейшим явлением, когда туман то появлялся, то исчезал, по мере того, как потоки воздуха то поднимались на гребни Шотландских гор, то вновь опускались в долины. Именно Вильсон открыл, что центрами конденсации пара могут стать не только пылинки, но и ионы, образовавшиеся при облучении пересыщенного пара рентгеновскими лучами или радиацией других видов (альфа-, бета-, гамма-). Со свойственным ему упорством, целеустремленностью и экспериментальным искусством (а Вильсон славился тем, что почти всю аппаратуру делал сам), проработав над этой темой около 15 лет, ученый создал новый прибор для регистрации частиц. Он назвал его «туманной камерой», но очень скоро экспериментаторы переименовали ее в «камеру Вильсона». Опишем теперь в самых общих чертах принцип ее работы. Объем, наполненный парами жидкости (вода, спирт и т. п.); с помощью поршня или диафрагмы резко увеличивается. Пар, тщательно очищенный от пыли, некоторое время ( $0,1 \div 1$  с) находится в пересыщенном состоянии и не конденсируется. Если в этот момент через объем пролетает частица, оставляя след из ионов, то на них начинают возникать капли. След частицы становится видимым и может быть сфотографирован. Для этого стенка (или стенки) камеры делаются прозрачными. Потом, довольно быстро, за счет теплопроводности стенок температура пара повышается и капли исчезают. Надо опять готовить камеру к работе и эта подготовка требует уже десятков секунд. В этом и состоит главный недостаток прибора, как говорят физики, «большое мертвое время». Но прежде чем более

совершенные установки вытеснили «туманную камеру», прошли десятки лет, и с ее помощью были сделаны выдающиеся открытия. Поэтому Ч. Вильсон «за метод делать видимый пути заряженных частиц с помощью конденсации пара» получил в 1927 г. Нобелевскую премию по физике \*).

Итак, физики могли вообще наблюдать частицы и определять многие их характеристики. Вот на снимках «жирные следы»  $\alpha$ -частиц, а вот — редкие капли, образованные быстрыми электронами. Разницу легко объяснить, если воспользоваться приближенной формулой для числа ионов  $N$ , образующихся на 1 см пути (см. (19)),

$$N \sim z^2/v^2.$$

Электрон с энергией 5 МэВ движется практически со скоростью света, а  $\alpha$ -частица с той же энергией — в 20 раз медленнее. Кроме того, она имеет в два раза больший заряд.

Но камера еще не могла измерять энергию быстрых электронов и отличать знак заряда. Например, протон, летящий с  $v_p \approx c$ , оставлял такой же след, как и быстрый электрон (хотя энергия протона должна была быть в 2000 раз больше, чем у электрона). Следующее звено в цепи событий связано с именем Д. В. Скобельцына.

Молодой ленинградский физик решил использовать камеру Вильсона для фотографирования электронов отдачи, которые появлялись в газе при облучении ее  $\gamma$ -лучами (комpton-эффект). Измеряя кривизну траектории электронов на фотографиях, можно найти их импульс \*\*). Мы сейчас не будем останавливаться на исследовании комpton-эффекта, которое само по себе дало исключительно интересные результаты.

Вот что писал Скобельцын: «На снимках обнаруживались время от времени прямые пути частиц неизвестного происхождения, почти не отклоняемые магнитным полем, но по своему ионизирующему действию не отличающиеся сколько-нибудь от быстрых  $\beta$ -лучей, фотографии которых имеются на тех же снимках.

\*) Внешне простой принцип работы туманной камеры (его описание есть даже в школьных учебниках) не дает ни малейшего представления о тех физических и технических трудностях, которые возникали при ее изготовлении и наладке.

\*\*\*) Вспомним формулы из п. 3.2.

Дальнейшие наблюдения, которые были опубликованы в 1925 г., позволили установить, что появление путей таких «ультра- $\beta$ -лучей» отнюдь не связано с прохождением через камеру Вильсона  $\gamma$ -лучей, что налицо поток частиц, пронизывающих атмосферу». Таких быстрых, что они не отклонялись в относительно слабом поле камеры.

Скобельцын доказал также, что ионизация, создаваемая космическим излучением, может быть объяснена «ультра- $\beta$ -частицами». На ряде снимков Скобельцына был виден целый поток быстрых частиц. Их назвали космическими ливнями.

Итак, звенья цепочки, ведущей к позитрону, были собраны:

1. Открыты космические лучи и выяснено, что в их состав входят заряженные частицы;

2. Создан прибор — камера Вильсона, помещенная в магнитное поле. Вот только поле пока еще было мало и не отклоняло «ультра- $\beta$ -лучи».

### 5.6. Позитрон и «пары»

Мы уже упоминали имя Роберта Эндрюса Милликена. Это был выдающийся физик, получивший в 1923 г. Нобелевскую премию «за работы по изучению элементарного заряда электричества ( $e^-$ ) и фотоэлектрического эффекта». По воспоминаниям друзей он сочетал в себе (кроме многих других исключительных черт) два качества, которые было трудно не заметить. Разговорчивость, во много раз превышающую среднюю норму, и выдающуюся физическую интуицию. Сыграло ли какую-нибудь роль первое для открытия позитрона — осталось неизвестным. Но второе оказалось решающим. Узнав об опытах Скобельцына, Милликен сразу же поручил одному из своих сотрудников — Карлу Андерсону — начать исследования космического излучения с помощью камеры Вильсона, по уже помещенной в значительно более сильное магнитное поле (в 20 раз большей величины). Это потребовало и экспериментального искусства, и исключительных для того времени технических средств.

И вот получены фотографии, на которых видны искривленные траектории космических частиц. Плотность ионизации и радиус кривизны траектории — все говорило о том, что некоторые из них принадлежат электронам. Но

как объяснить появление следов с «неправильной» кривизной, «завернутых» в противоположную сторону. На фотграфиях их приблизительно столько же, сколько и электронных!

Первое предположение, и весьма естественное, заключалось в том, что это протоны. Другой знак заряда — другой знак кривизны траектории. Но исследование фотграфий привело к выводу, что ионизирующая способность положительных частиц практически та же, что и у электронов. Следовательно, скорость их близка к скорости света, импульс велик и в магнитном поле они не должны были отклоняться, как электроны. Вывод один — не протоны.

Второе предположение заключалось в том, что «неправильные частицы» — электроны, но летящие в противоположном направлении — снизу вверх. Тогда Андерсон поставил посередине камеры свинцовую пластину. И определил, что частицы летят сверху вниз, поскольку кривизна их траекторий в нижней половине камеры больше — они потеряли часть энергии, пролетая через свинец. При полете снизу вверх картина была бы обратная: траектория частиц имела бы меньший радиус кривизны в верхней части камеры.

И вот в 1932 г. Андерсон предположил, что новые частицы не что иное, как «положительные электроны» с массой  $m_0$  и зарядом  $+e$ . Его доказательства вскоре были убедительно подтверждены в экспериментах Блэкетта и Оккалинани. Они показали, кроме того, что появление позитронов в камере связано с ливнями космического излучения.

Самое поразительное было даже не в открытии новой частицы, хотя в физике, особенно в то время, это было событием первостепенной важности. Поразительным было то, что обнаружилась частица, предсказанная в 1931 г., в существование которой никто не верил.

«Мелодия превращается в скрипку» — это слова академика С. И. Вавилова. На одной из лекций он рассказывал о процессе, обратном реакции аннигиляции позитрона, когда летящий гамма-квант рождает пару электрон + позитрон: |

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-.$$

Такой процесс превращения электромагнитного поля в вещество был открыт почти одновременно в 1933 г. четырь-

мя группами физиков: во Франции, Германии, Англии и США.

Существует два обязательных условия рождения пары. Первое — энергия гамма-кванта должна превышать сумму энергий покоя компонент пары:

$$E_{\gamma} > 2m_0c^2 \approx 1,02 \text{ МэВ.}$$

И, второе, присутствие ядра или электрона, которые должны принять на себя избыток энергии и импульса. Иначе нарушатся законы их сохранения.

Это можно доказать строго (предоставляем это читателю). А мы ограничимся следующим рассуждением. Всегда можно выбрать такую систему отсчета, в которой полный импульс образовавшейся пары равен нулю. Для гамма-кванта, летящего со скоростью света, такой системы выбрать нельзя. Поэтому необходимо присутствие третьего тела, которому он мог бы передать часть импульса и энергии.

Теперь мы можем окончить затянувшееся отступление и возвратиться к прохождению  $\gamma$ -квантов через вещество. Рождение электронно-позитронных пар объяснило один непонятный эффект, с которым в 1930 г. столкнулись исследователи. Они изучали прохождение жесткого гамма-излучения через различные материалы и обнаружили аномально сильное поглощение квантов. Гораздо большее, чем это предсказывала существовавшая теория. (А в то время с помощью квантовой механики физики могли точно рассчитать такие процессы, как фотоэффект и комптон-эффект.) Расчеты и эксперимент стали полностью совпадать после открытия третьего процесса.

Легко себе представить, что если бы К. Андерсон не открыл «вовремя» позитрона, то это вполне могли сделать те, кто изучал поглощение квантов в веществе. И это полностью согласуется со словами Э. Резерфорда о случайных открытиях, которые мы приводили.

Итак, следы гамма-кванта, оставленные в веществе, всегда связаны со вторичными частицами — электронами или электронно-позитронными парами.

При разных энергиях излучения  $E_{\gamma}$  преобладают по очереди все три процесса. Например, при прохождении сквозь свинец при  $E_{\gamma} < 0,5 \text{ МэВ}$  первенство принадлежит фотоэффекту, в диапазоне энергий  $0,5 \text{ МэВ} < E_{\gamma} < < 5 \text{ МэВ}$  — комптон-эффекту, для  $E_{\gamma} > 5 \text{ МэВ}$  — рож-

дению пар. Вообще же гамма-излучение взаимодействует с веществом на много порядков слабее заряженных частиц. Если необходимо ослабить пучок квантов с энергией 10 МэВ в 1000 раз, то необходимая толщина вещества составит 3,5 м воды или 13 см свинца (для  $\alpha$ -частиц такой же энергии понадобился бы слой воды в десять тысяч раз толще).

## 5.7. Антивещество

Открытие позитрона позволило впервые заглянуть в антимир. Но уже в своей замечательной работе 1931 г. Дирак упоминает о возможности существования такой частицы, как антипротон. Позднее физики пришли к выводу, что каждой из многих существующих элементарных частиц соответствует своя античастица с такой же массой, спином, но с противоположными знаками заряда и магнитного момента. Бывают случаи, когда частица и античастица совпадают. Это имеет место для гамма-кванта. Встречаясь, частица и античастица исчезают — аннигилируют. При этом рождаются гамма-кванты (или другие частицы). Иногда позитрон, летящий в веществе, не сразу аннигилирует с электроном, а образует с ним единую систему — нечто вроде водородного атома, в котором роль протона играет позитрон. Такая система носит название «позитроний» и живет очень недолго — около  $10^{-10}$  с.

Следующие шаги в антимир — открытие антипротона и антинейтрона — были сделаны только через четверть века. Для этого понадобилось создать ускорители частиц высоких энергий. На этих машинах (о них еще речь впереди) были получены и первые антиядра.

В 1970 г. советские ученые синтезировали ядро, состоящее из двух антипротонов и антинейтрона — *антигелий 3*.

Хотя рассказ об антивеществе можно продолжать еще очень долго, мы должны вернуться к следующим видам взаимодействия. На страницах этой книги читатель еще раз услышит об античастице в главе «Радиохимия. Солнце и нейтрино».

## 5.8. Вопросы и задачи

17. Может ли гамма-квант с энергией  $h\nu$  и импульсом  $h\nu/c$  передать их изолированному электрону, т. е. может ли произойти фотоэффект на одном электроне?

18. Основные законы фотоэффекта были установлены выдающимся русским физиком А. Г. Столетовым (1888 г.). Результаты своих опытов он суммировал в двенадцати тезисах. Вот некоторые из них:

«1. Лучи вольтовой дуги, падая на поверхность отрицательно заряженного тела, уносятся с него заряд...

2. Это действие лучей есть строго униполярное; положительный заряд лучами не уносится...

4. Разряжающим действием обладают — если не исключительно, то с громадным превосходством перед прочими — лучи самой высокой преломляемости ... ( $\lambda < 195 \cdot 10^{-8}$  мм) ...

12. ... действие лучей усиливается с повышением температуры».

На основании современных представлений о фотоэффекте объясните эти тезисы, а для пункта 4 определите работу выхода металла, поверхность которого освещалась.

19. В опытах, поставленных в 1923 г., Артур Комптон обнаружил, что если рентгеновское излучение с длиной волны  $\lambda$  рассеивать на каком-либо веществе (в первых опытах использовался графит), то наблюдаются кванты с большей длиной волны  $\lambda'$  и разность  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  растет с увеличением угла рассеяния. Покажите это, используя формулы (22) и (23) и считая, что скорость электрона много меньше скорости света (нерелятивистский случай).

## Глава 6

### ВНУТРИ ЯДРА

#### 6.1. Нейтроны и ядерные силы

Открыв ядерное ядро, необходимо было сделать следующий шаг — понять, что же находится внутри него. Опыты Резерфорда показали, что положительный заряд в ядре несут тяжелые частицы — протоны. Но при попытках объяснить соотношение между зарядом и массой ядер, более сложных, чем водород, сразу же возникали трудности. Если они состоят из протонов, то почему заряд ядра гелия в два раза больше, чем у протона, а масса больше в четыре раза? Такое несоответствие возникает и для других ядер. Тогда предположили, что наряду с протонами в ядре содержатся и электроны. В ядре гелия четыре протона и два электрона, которые и компенсируют заряд двух протонов. В тяжелых ядрах электронов больше. Казалось, такая гипотеза объясняет структуру материи, но появившаяся квантовая механика воспротивилась желанию фи-

зиков «запихнуть» электроны в ядро. Действительно, если электрон находится внутри него, то неопределенность его координаты  $\Delta r$  не может сильно превышать размеры ядра, скажем,  $10^{-14}$  м. Тогда минимальные значения неопределенности импульса  $\Delta p = \hbar/\Delta r \approx 10^{-20}$  кг·м/с (согласно соотношению неопределенности Гайзенберга) и энергии электрона  $\Delta K \approx \Delta p \cdot c \geq 20$  МэВ.

Чтобы удержать электрон в ядре, глубина потенциальной ямы должна превышать  $\Delta K$ , т. е.  $\Delta \Pi < -20$  МэВ. Но электрические силы на расстоянии  $\Delta r = 10^{-14}$  м дают абсолютную величину  $\Pi$ , во много раз меньшую. Итак, если электроны находятся внутри ядра, то не очень понятно, что их там удерживает. Тем не менее протонно-электронная гипотеза существовала довольно долго, пока в знаменательном 1932 г. Чедвик, ученик и сотрудник Резерфорда, не открыл нейтрон — нейтральную частицу с массой, близкой к массе протона. Почти сразу же и почти одновременно физики из разных стран — из Советского Союза Д. Д. Иваненко, из Италии — Э. Майорана, из Германии — В. Гайзенберг — пришли к выводу, что кирпичики, из которых складываются атомные ядра, — это протоны и нейтроны. Связаны они не известными еще силами. С этого момента и ведет свое начало наука, называемая ядерной физикой.

Познакомимся теперь подробнее с нейтроном. Вот его «паспорт».

Электрический заряд равен нулю. Масса — 939,54 МэВ \*) (или  $1,6749 \cdot 10^{-27}$  кг), что на 1,3 МэВ больше массы протона (разница около десятой процента). Спин —  $1/2 \hbar$ . Нейтрон — ферми-частица. То, что свободный нейтрон тяжелее протона, делает его нестабильным (см. рис. 6), а вот в ядрах он может не распадаться. Все дело в том, что внутри ядра протоны и нейтроны связаны новым видом сил — ядерными, сильным взаимодействием. Эксперименты показали, что эти силы действуют, не различая протоны и нейтроны. Для ядерных сил эти частицы одинаковы, и когда хотят это подчеркнуть, то оба сорта частиц называют просто *нуклонами*. Силы эти разительно отличаются от электромагнитных. Прежде всего они короткодействующие, нуклоны не чувствуют друг друга, пока не сблизятся до расстояний  $10^{-14} \div 10^{-15}$  м. Затем «щелк» —

\*) Под массой элементарных частиц часто подразумевают энергию покоя  $m_0 c^2$ , другими словами, измеряют массу в единицах энергии.

и включается ядерное поле, которое в 100 раз интенсивнее электромагнитного, и сжимает вещество до плотности 250 млн. т в 1 см<sup>3</sup>. Эти силы и делают нейтроны в ядре легче, чем в свободном состоянии. Вспомним вторую главу, в которой говорилось, что масса покоя взаимодействующих частиц меньше, чем арифметическая сумма их масс. Разница идет на энергию связи частиц между собой. Для элементов средней части периодической таблицы связанный в ядре нейтрон имеет массу не 939 МэВ, а на 6 ÷ 8 МэВ меньше. Тогда его распад разрешен далеко не всегда. Мы еще вернемся к вопросу о превращениях нуклонов внутри ядра и о бета-распаде, а сейчас в нескольких словах расскажем о ядрах.

Из-за огромности ядерных сил кулоновское отталкивание между протонами не разрушает ядер вплоть до больших значений заряда  $Z$  ( $Z$  — число протонов в ядре — атомный номер), но естественно сказывается на их строении: в легких стабильных ядрах протонов и нейтронов приблизительно поровну,  $Z = N$ , в тяжелых  $N = 1,6Z$ . Полезно будет запомнить несколько терминов, связанных с соотношением нейтронов и протонов. Так, ядра с одинаковым полным числом нуклонов  $A = Z + N$  ( $A$  — массовое число) называются *изобарами*; с одинаковым зарядом  $Z$  (ядра одного химического элемента), но с разным числом нейтронов — *изотопами*, с разным  $Z$ , но одинаковым  $N$  — *изотонами*. Для элементов приняты следующие обозначения:  $\frac{A}{Z}$  (символ элемента). Например,  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^9_4\text{Be}$ ,  ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ ,  ${}^{37}_{18}\text{Ar}$  и т. п.

Стабильных ядер меньше, чем нестабильных. Первых в настоящее время известно около 350, а нестабильных — более тысячи. Огромное большинство их получают на ускорителях и реакторах, это — искусственные радиоактивные изотопы, в отличие от естественных — урана, радия, тория и т. п.

Еще до открытия нейтрона Резерфорд предсказал, что если будет обнаружена нейтральная частица, то она станет прекрасным инструментом для исследования атомного ядра. До 1932 г. физики чаще всего пользовались одним видом снарядов — для обстрела ядер — альфа-частицами. Теперь они могли бомбардировать материю нейтронами. Хотя интенсивность первых источников нейтронов была мала, но свойства новой частицы искупали этот недостаток. Отсутствие заряда позволяет нейтрону

сблизиться с ядром и проникнуть внутрь него гораздо легче, чем положительно заряженной альфа-частице или протону. Нейтроны очень слабо взаимодействуют с электронами среды и длина их пробега в веществе несравненно больше, чем у заряженных частиц той же энергии.

Экспериментаторы стали теперь «обстреливать» ядра нейтронами и больших успехов на этом пути добились итальянские физики.

## 6.2. Открытие Ферми

Несколько лет назад, в одном из московских институтов проходила олимпиада для старших школьников. Среди прочих была предложена и такая задача.

«Нейтронный источник облучает пластинку из серебра и затем ее активность определяется счетчиком. Если на пути между источником и пластинкой поместить кусок парафина, активность серебра значительно увеличивается. Объясните это явление».

Не знаю, ответил ли кто-нибудь правильно на этот вопрос, но он продемонстрировал очень высокое мнение организаторов олимпиады о наших учащих. Потому что человек, объяснивший такое возрастание активности, в 1938 г. получил за это (и ряд других исследований) Нобелевскую премию. Это итальянский физик Энрико Ферми, уже упоминавшийся на страницах нашей книги.

Дело было так:

Группа физиков в лаборатории Римского университета изучала искусственную радиоактивность, которая возникала при облучении различных элементов нейтронами. Нейтроны захватывались ядрами образца, те становились радиоактивными и распадались с испусканием  $\beta$ -частиц. Из 63 исследованных веществ у 37 была найдена такая радиоактивность. Руководил исследованиями Ферми, ему в то время было 33 года, а самому младшему из членов группы, Бруно Понтекорво — 21 год. Именно он и Эдоардо Амальди обнаружили странный эффект — активность облучаемого образца (им в этом опыте было серебро) зависела не только от источника, но и от окружающих предметов. Источник нейтронов помещался внутри серебряного цилиндрика. И вот, в зависимости от того, стоял ли цилиндрок на деревянном столе, мраморной скамье или на металлической пластине, счетчик, к которому потом его

подносили (источник, конечно, вынимали), считал, то больше, то меньше испускаемых частиц. Утром 22 октября 1934 г., как вспоминает Ферми, он посоветовал поместить между цилиндром и вынутым из него источником кусок парафина. Ученый потом сам не мог объяснить, чем он руководствовался. «Это было именно так — никаких предчувствий, никаких сознательных предварительных рассуждений».

Сравнили счет в присутствии парафина и без него при прочих одинаковых условиях. Парафин увеличивал активность серебра почти в сто раз!

«Сначала я подумал, что испортился счетчик — таких огромных активностей мы никогда раньше не получали, но было немедленно показано, что это возрастание обусловлено именно парафином. В качестве фильтров на пути нейтронов мы испытали несколько других веществ, но они не давали столь большого эффекта, как парафин. К нашему обычному перерыву на обед и отдых наши наблюдения все еще были для нас сплошной загадкой». После обеда загадки уже не было, так как за это время Ферми нашел объяснение происходящим явлениям.

Источник в опытах римской группы излучал в основном быстрые нейтроны. А они захватываются ядрами с гораздо меньшей вероятностью, чем медленные. Их необходимо замедлить и эту задачу выполнил парафин. Когда быстрый нейтрон влетает в вещество, то чаще захвата идет процесс, при котором ядро и нейтрон ведут себя как упругие шарики с массами  $m_n = A$  и  $m_n = 1$  \*). Частица налетает на ядро и упруго рассеивается. При этом ее кинетическая энергия  $K_n$  уменьшается, в среднем на величину  $(\Delta K_n / K_n)_{\text{ср}} = 2A / (1 + A)^2$  \*\*). Для тяжелых ядер это уменьшение незначительно, для  $A = 100$  оно составляет 2% первоначальной энергии нейтрона. Совсем другая картина возникает при прохождении нейтрона через водородосодержащую среду, например, парафин. При каждом столкновении с протоном средняя потеря энергии составляет половину первоначальной, и частице с  $K_n = 1$  МэВ потребуется всего около 25 соударений с ядрами водорода, чтобы ее энергия стала близка к энергии теплового движения, что составляет 0,025 эВ.

\*) Массы приведены в атомных единицах массы (а.е.м.): 1 а.е.м. =  $1,6606 \cdot 10^{-27}$  кг.

\*\*\*) См. задачу 22.

Помещение парафина на пути между источником и образцом позволило преобразовать энергетический спектр нейтронов. Число медленных нейтронов увеличилось во много раз и соответственно возросла вероятность захвата их серебром.

### 6.3. Поля

Мы говорили о захвате нейтронов, о взаимодействии их с ядрами, о внутриядерных силах. Как представить себе поле таких сил? Для ответа на этот вопрос нам придется вернуться к электромагнетизму.

После создания квантовой механики физики в конце 20-х годов начали разрабатывать квантовую электродинамику.

Долгие годы эта наука была наиболее последовательной и успешной из всех теорий элементарных частиц. Разработанные в ней методы служили образцом для описания других видов взаимодействия.

С точки зрения этой теории поле заряда есть совокупность электромагнитных квантов — фотонов, которые непрерывно излучаются и поглощаются частицей. Она как бы окружена их ореолом. Природа таких квантов не совсем обычна. Чтобы не нарушался закон сохранения энергии (откуда, скажем, покоящемуся электрону взять энергию для излучения кванта?), время  $\Delta t$  между испусканием и поглощением фотона ограничивается соотношением неопределенности  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ . Именно неопределенность в значении энергии электрона позволяет существовать фотону.

Если  $\Delta t$  мало,  $\Delta E$  достаточно велико. За счет «размытой» энергии квант может в свою очередь родить пару электрон — позитрон (заряд должен сохраняться!). И вот, электромагнитное поле представляется теперь совокупностью появляющихся и исчезающих фотонов, электронов и позитронов.

Частицы, существование которых обеспечивается соотношением неопределенности, называются «виртуальными» (возможными). Прямо зарегистрировать их нельзя. Но стоит сообщить заряду достаточную энергию — и кванты станут реальными так же, как и рождающиеся пары.

Р. Фейнман создал наглядный метод описания взаимодействия частиц в теории поля — метод диаграмм. Одну из них можно видеть на рис. 13. Происходит рассе-

яние одного электрона на другом. Механизм его таков: первый электрон испускает виртуальный фотон, второй его поглощает и таким образом частицы взаимодействуют. Конечно, электроны могут обмениваться и двумя, и тремя, и большим числом фотонов. Но эти процессы все менее вероятны.

За время  $\Delta t$  фотон пролетает расстояние  $\Delta l = c\Delta t$ ; при этом  $\Delta E \leq \hbar c/\Delta l$ . Масса покоя фотона равна нулю и  $\Delta E$  может быть сколь угодно малой, а  $\Delta l$  — велико. Это соответствует тому, что электроны, хотя и слабо, но взаимодействуют на далеких расстояниях.

Перейдем теперь к сильным взаимодействиям. В 1935 г. японский физик Юкава пришел к выводу, что ограниченный радиус действия ядерных сил ( $10^{-15}$  м) говорит о том, что кванты ядерного поля, те самые, которые осуществляют взаимодействие между нуклонами, обязательно должны иметь массу покоя. И далеко не маленькую. Из оценок Юкавы она получалась приблизительно равной 150 МэВ. Попробуем качественно проиллюстрировать это утверждение, опираясь на соотношение неопределенности для энергии и времени. Если масса кванта  $m_0 c^2 = 150$  МэВ, то при излучении нуклоном такой виртуальной частицы неопределенность в энергии  $\Delta E$  должна быть больше 150 МэВ. Это приводит к ограничению времени существования кванта:

$$\Delta t < \frac{\hbar}{\Delta E} = \frac{6,5 \cdot 10^{-16} \text{ эВ} \cdot \text{с}}{150 \cdot 10^6 \text{ эВ}} \approx 4 \cdot 10^{-24} \text{ с.}$$

Вот время, отпущенное переносчику ядерного взаимодействия. Даже если сам он движется со скоростью света, то расстояние, на которое квант может удалиться от нуклона, не превышает  $R < c \cdot \Delta t \approx 10^{-15}$  м. Таким образом, получается правильный порядок для размеров сферы действия ядерных сил.

Только спустя двенадцать лет после работы Юкавы такая частица была открыта. Мы уже говорили о ней — именно ее «фотографический портрет» приведен на рис. 8. Это  $\pi$ -мезон. Масса его составляет 139 МэВ.



Рис. 13. Рассеяние электрона на электроне. Диаграмма Фейнмана. Один электрон испускает  $\gamma$ -квант, второй его поглощает.

Итак, нуклон долгое время представлялся как некое мерцающее облако из возникающих и исчезающих  $\pi$ -мезонов и пар нуклон — антинуклон. Сильное взаимодействие осуществляется обменом виртуальными  $\pi$ -мезонами на малых расстояниях.

Шло время и все до больших энергий разгонялись потоки частиц на ускорителях, и все дальше в глубь материи могли заглянуть экспериментаторы. Оказалось, что сильное взаимодействие устроено очень сложно. Обмен  $\pi$ -мезонами — это хотя и верное, но только первое приближение в описании ядерных сил.  $\pi$ -мезоны — не элементарные кванты поля, подобно фотонам в электромагнетизме. Они, так же как и нуклоны, состоят из совершенно особых частиц — кварков, а кварки, взаимодействуя между собой, обмениваются квантами поля, носящими название *глюонов* (от английского слова *glue* — клей).

В этом параграфе мы обсуждали многие трудные вопросы. Но самое главное, что надо вынести из него, это то, что любое взаимодействие есть обмен виртуальными частицами, а ограниченность радиуса действия какого-либо типа сил свидетельствует о том, что у частиц, переносящих взаимодействие, есть масса.

#### 6.4. Сохранение барионного заряда

Со временем число известных элементарных частиц все увеличивается. И для удобства классификации их объединяют по различным признакам в группы и придумывают таким группам названия. Так, все частицы, которые принимают участие в сильном взаимодействии, называются *адронами*. Адроны делятся на два больших класса — более легкие со спином, значение которого выражается в целых числах  $\hbar$ , называются *мезонами*. С представителями этого класса  $\pi$ -мезонами мы встречались. Тяжелые адроны, имеющие полуцелый спин, образуют класс *барионов*. Сюда относятся нуклоны — нейтрон и протон, антинуклоны — антинейтрон ( $\bar{n}$ ) и антипротон ( $\bar{p}$ ) и другие частицы, например, лямбда-гиперон ( $\Lambda^0$ ), и т. д. Изучая процессы, происходящие с элементарными частицами, физики пришли к выводу, что в любых столкновениях, распадах, реакциях рождения всегда сохраняется величина: число барионов минус число антибарионов. Например,  $\Lambda^0$ , распадаясь, превращается в протон и  $\pi$ -мезон, при распаде свободного нейтрона обязательно появляется протон,

а разогнанный до больших энергий  $\pi^0$ -мезон может родить только пару нуклон и антинуклон, а, скажем, не два нейтрона. Если приписать барионам заряд  $+1$ , антибарионам заряд  $-1$ , а всем остальным частицам  $-0$ , то суммарный заряд при всех известных превращениях остается постоянным — в природе выполняется закон сохранения барионного заряда (ЗСБЗ). Конечно, термин «заряд» в применении к барионам не совсем удачен: «Следует подчеркнуть, что в отличие от электрического заряда барионный не создает вокруг себя электрического поля и не является источником какого-либо дальнего действия. Он просто сохраняется...» (Л. В. Окунь). С какой точностью выполняется этот закон и не существуют ли очень редкие процессы, при которых он нарушается?

При этих вопросах взоры экспериментаторов обратились к протону. Он самый легкий из барионов, и если ЗСБЗ приближителен, то протон может распадаться на мезоны, например,  $\pi^0$ - и  $\pi^+$ -мезоны. Существование нашего мира прямо указывает на то, что протон достаточно стабилен. Иначе за время жизни Вселенной ( $10^{10}$  лет) все ядра распались бы и все вопросы отпали сами собой. Тем не менее, даже при очень большом времени жизни протона ( $\tau_p$ ), этот процесс можно было зарегистрировать и опыты были проведены. Они дали значение  $\tau_p > 10^{30}$  лет.

Интерес к вопросу о стабильности протона вспыхнул с новой силой в связи с попытками «великого объединения» электромагнитных, слабых и сильных взаимодействий.

В новых теориях разрешены процессы, которые могут привести к распаду протона с  $\tau_p = 10^{31} \div 10^{33}$  лет. Сейчас несколько групп экспериментаторов объявили о своих намерениях попытаться обнаружить распад протона.

## 6.5. Вопросы и задачи

20. В 1960 г. был проведен эксперимент, доказавший, что в поле земного тяготения нейтроны падают с ускорением  $\approx 9,8 \text{ м/с}^2$ , так же, как и макроскопические тела. В этом эксперименте пучок нейтронов из реактора проходил через горизонтальную щель и, пролетев  $l = 400 \text{ м}$ , попадал в детектор. При этом детектор регистрировал только те частицы, энергия которых  $K$  превосходила  $5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$ . Он мог перемещаться по вертикали в плоскости, перпендикулярной к оси пучка. Когда детектор опускался на  $\Delta h = 8 \text{ см}$  ниже этой оси, он переставал считать. Определите величину ускорения свободного падения нейтрона (массу нейтрона  $m_n$  — см. в тексте).

21. Оцените плотность ядерного вещества, воспользовавшись значением массы нуклона и радиуса ядерных сил.

22. Происходит упругое столкновение нейтрона ( $m_n = 1$ ) с покоящимся ядром ( $m_n = A$ ). Найти максимальную и среднюю энергию, которую может потерять нейтрон в таком столкновении.

23. Дельта-резонанс  $\Delta^+$  распадается на нуклон и  $\pi^0$ - или  $\pi^+$ -мезоны. Напишите возможные реакции. Что можно сказать о барионном заряде этого резонанса?

24. «Черный вихрь, склонны скалы — все это исчезло в долю секунды. Казалось, на дне ущелья вспыхнул вулкан. Столб дыма и кипящей лавы, каменных обломков, наконец, — огромное, окруженное вуалью пара облако возносилось все выше. Пар, в который, наверное, превратился журчащий поток, достиг полуторакилометровой высоты, где парил телевизор».

Циклон привел в действие излучатель антиматерии». Это отрывок из повести прекрасного польского писателя-фантаста Станислава Лема «Непобедимый».

Оставляя на совести автора проблемы получения, транспортировки, хранения и т. п. антиматерии\*), оцените, какое число антинуклонов необходимо, чтобы нагреть от 20 до 100 °С озеро объемом  $1000 \times 1000 \times 2 \text{ м}^3$ . Чему будет равна масса антивещества в килограммах?

## Глава 7

### СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

#### 7.1. Почему они слабые?

Самые быстрые из известных в мире процессов идут под действием сильного взаимодействия, например, распады частиц-резонансов. Они происходят за время  $\tau$ , пока частица, движущаяся со скоростью, близкой к скорости света, сместится на ядерные расстояния ( $10^{-15} \text{ м}$ ). Таким образом,  $\tau \approx 10^{-22} \div 10^{-23} \text{ с}$ . Гораздо медленнее действуют

---

\*) В очень многих и достаточно интересных научно-фантастических книгах космонавты, пришельцы и другие разумные существа используют антиматерию как источник энергии. Читатели постепенно привыкают к этому и, как показывает опыт преподавания в ШЕН, начинают считать, что перечисленные проблемы вот-вот решатся. Чтобы проиллюстрировать действительное положение вещей, я позволю себе воспользоваться книгой В. Смилги «Очевидное? Нет, еще неизведанное...» (которую настоятельно рекомендую достать и прочесть). В ней дается краткий, но исчерпывающий ответ на вопрос о надеждах сохранить антивещество в магнитных полях («магнитных бутылках») при современных технических средствах: «Надеяться можно вообще на все, что угодно. Например, в средние века примерно столь же обоснованно полагали, что в обычной (немагнитной) бутылке можно запечатать дьявола».

электромагнитные силы. Распад  $\pi^0$ -мезона на два гамма-кванта происходит за  $\sim 10^{-15}$  с, а в ядрах, где энергия излучения меньше и много разных причин; способных задержать электромагнитные процессы,  $\tau_p = 10^{-15} + 10^{-6}$  с.

Со слабыми взаимодействиями физики столкнулись впервые, изучая бета-распад. Он происходит за вполне «человеческие» времена — секунды, минуты, годы. И, следовательно, вызывающие его силы намного слабее электромагнитных — отсюда и название для взаимодействия.

Бета-распад становится возможным тогда, когда при замене в ядре нейтрона на протон (или наоборот, протона на нейтрон) получающееся новое ядро имеет меньшую массу покоя — т. е. большую энергию связи. Избыток энергии распределяется между продуктами реакции. Бета-распад бывает трех видов:

1) один из нейтронов в ядре превращается в протон и излучается электрон ( $\beta^-$ -распад):



Очевидно, что при таком распаде энергия покоя материнского ядра  $E_M$  должна превышать энергию покоя дочернего  $E_D$  более, чем на  $m_e c^2 = 0,511$  МэВ.

О простейшем из всех  $\beta^-$ -распадов — распаде свободного нейтрона мы уже говорили, перечисляя свойства нейтрона, в предыдущей главе. (В этом случае выделяющаяся энергия  $E_M - E_D = 1,3$  МэВ идет на образование электрона и кинетическую энергию продуктов реакции.)

2) Протон, входящий в состав ядра, распадается на нейтрон и позитрон ( $\beta^+$ -распад):



3) Наконец, ядро иногда захватывает ближайший из атомных электронов (электронный захват) и превращается в другое ядро с зарядом, на единицу меньшим:



$\beta$ -частица при этом не излучается.

## 7.2. Загадки бета-распада

Исследования бета-распада сразу же поставили перед физиками ряд трудных проблем. Прежде всего, загадкой был непрерывный спектр энергий испускаемых электронов (рис. 14). Действительно, на долю до-

черного ядра при распаде приходится незначительная часть энергии. Практически вся разность  $E_m - E_d - mc^2$  расходуется на кинетическую энергию электрона и величина эта постоянная. На опыте же наблюдалась картина, представленная на рис. 14. Испускались электроны любых энергий, вплоть до некоторой граничной  $E_{гр} \approx E_m - E_d - mc^2$ . При  $\alpha$ -распаде ничего похожего не происходило — вылетали  $\alpha$ -частицы одной или нескольких определенных энергий. Поэтому предположили, что виноват источник —  $\beta$ -частицы теряют свою энергию, когда

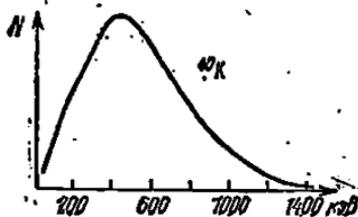


Рис. 14. Распределение по энергиям (спектр) электронов, вылетающих при распаде кальция-40 ( $N$  — число  $\beta$ -частиц).

проходят сквозь его материал. От этого первоначальный линейный спектр размывается. Для проверки этой гипотезы несколько групп экспериментаторов поставили так называемые калориметрические опыты. Делались они так: радиоактивный препарат помещался в калориметр с толстыми стенками, такими, чтобы  $\beta$ -частицы в них полностью поглощались. Это позволило измерить энергию,

выделяющуюся за определенное время. Зная активность источника и, тем самым, полное число испускаемых электронов, рассчитали энергию, приходящуюся на одну  $\beta$ -частицу. Экспериментаторы ожидали, что она окажется близкой к  $E_{гр}$ , но раз за разом получали величину, приблизительно в два раза меньшую, в соответствии со спектром на рис. 14.

Была и вторая загадка бета-распада. Она заключалась в том, что в этом процессе не выполнялся закон сохранения момента импульса. Подсчет спинов материнского и дочернего ядра и вылетевшего электрона обнаруживал «недостачу момента». Дефицит составлял по меньшей мере  $-\frac{1}{2}\hbar$ .

Приблизительно в это время Н. Бор произнес свою знаменитую фразу: «Следует ожидать от бета-распада дальнейших сюрпризов».

И тут Вольфганг Паули придумал блестящий выход из положения, обеспечивший работой экспериментаторов на многие годы вперед.

### 7.3. На сцене появляется нейтрино

22 октября 1933 г. в Брюсселе открылся VII Сольвеевский конгресс. Эти международные встречи ученых, занимающихся строением вещества, вели свое начало с 1914 г. Тогда бельгийский инженер-изобретатель Эрнест Сольвей, придумавший дешевый способ получения соды и разбогатевший на этом, впервые предоставил средства для такой встречи.

Перечень участников VII конгресса, так же как и предыдущих, — настоящий «звездный» список. Здесь и физики старшего поколения: Мария Кюри, Эрнест Резерфорд, Нильс Бор. И более молодые, но уже известные своими открытиями ученые: Дж. Чедвик, П. Дирак, Э. Ферми, В. Паули. Супружеская пара Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри. Последние ждут очереди, чтобы рассказать о своих новых работах в ядерной физике. Многие тогда отнеслись к ним недоверчиво, можно сказать, почти все, кроме Бора и Паули. А через очень короткое время (всего около трех месяцев) супруги Жолио-Кюри поразили мир открытием искусственной радиоактивности.

Конгресс подытожил многие завоевания ядерной физики: Среди них нейтронно-протонная модель ядра, обнаружение позитрона в космических лучах, работы с тяжелым изотопом водорода — дейтерием, ядро которого состоит из протона и нейтрона. Уверенно работал новый ускоритель тяжелых элементарных частиц — циклотрон.

И именно в трудах этого конгресса была зарегистрирована гипотеза Паули о существовании новой частицы с удивительными свойствами. Впервые она была высказана им на три года раньше, еще в декабре 1930 г. в письме, отправленном на конференцию физиков в Тюбингенском университете. Это вошедшее в историю письмо начиналось и кончалось шутливо: «Дорогие радиоактивные дамы и господа! Я прошу Вас выслушать со вниманием в наиболее удобный момент посланца, доставившего это письмо. Он расскажет Вам, что я нашел отличное средство для спасения закона сохранения энергии и получения правильной статистики... Оно заключается в возможности существования электрически нейтральных частиц, которые я назову нейтронами. (Напомним, что частица, за которой утвердилось это название, была открыта через два года. Прим. автора)... Непрерывность бета-спектра станет понятной, если предположить, что при бета-распаде

с каждым электроном испускается такой нейтрон, причем сумма энергии нейтрона и электрона постоянна...

Итак, дорогой радиоактивный народ, рассматривайте и судите. К сожалению, я не могу появиться в Тюбингене лично, так как мое присутствие здесь необходимо из-за бала, который состоится в Цюрихе в ночь с 6 на 7 декабря.

Ваш покорнейший слуга В. Паули».

Как мы видели, Паули высказал предположение о том, что при бета-распаде испускается частица, обладающая высокой проникающей способностью, более неуловимая, чем гамма-квант. Эту частицу не могут задержать стенки калориметра и она уносит с собой часть энергии, импульса и момента импульса. Вскоре термин нейтрон был заменен термином нейтрино. Слово «нейтрино», что в переводе с итальянского означает — маленький нейтрон, маленькая нейтральная частица, вошло в обиход физиков с легкой руки Энрико Ферми. Сначала он употреблял его в неофициальных разговорах, потом в 1931 г. во время Римской конференции по физике, и отсюда этот термин распространился всюду. Обозначать новую частицу стали символом  $\nu$ .

К моменту Сольвеевского конгресса нейтрино достаточно прочно вошло в сознание физиков. Они поверили в существование частицы, у которой отсутствовал электрический заряд, масса была очень мала, и вообще, как бы специально созданной природой, чтобы ускользать от экспериментаторов. Следовало переписать уравнения бета-распада (26), (27) и (28), введя туда  $\nu$ :

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad \beta^- \text{-распад}, \quad (29)$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \quad \beta^+ \text{-распад}, \quad (30)$$

$$p + e^- \rightarrow n + \nu \quad \text{электронный захват}. \quad (31)$$

Окончательное утверждение новой частицы — 1934 год, когда появилась статья Э. Ферми о бета-распаде.

#### 7.4. Теория Ферми

В этой статье на основании гипотезы Паули была развита подробная количественная теория бета-распада. Она была построена по аналогии с электродинамикой. Так, Ферми предположил, что электрон и нейтрино рождаются в момент распада в одной точке, так же

как гамма-кванты, излучаемые ядрами. Для слабого взаимодействия он ввел константу  $G$ , которая играла ту же роль, что и элементарный заряд  $e$  в электромагнитных процессах, и вычислил ее величину на основании экспериментальных данных. Теория Ферми позволяла рассчитать форму  $\beta$ -спектров и связать граничную энергию распада с временем жизни радиоактивного ядра. Нейтрино в этой теории имело заряд и магнитный момент, равный нулю, массу покоя, также равную нулю (или много меньшую массы электрона), и спин  $1/2\hbar$ . В течение следующих лет теорию стремились видоизменить, дополнить и усложнить, поскольку казалось, что она слишком проста и не описывает всех опытных данных. Прошло достаточно много времени, прежде чем физики убедились, что все эти дополнения основаны на ошибочных экспериментах, а путь, который столь безошибочно угадал Ферми, — правильный.

Теория Ферми ничего не говорит о механизме взаимодействия — о квантах слабого поля, считая, что нейтрино и электрон рождаются в точке нахождения нуклона. Таким образом, это есть первое приближение, вполне достаточное для расчета процессов с относительно малой энергией — бета-распада. Но шло время и круг известных реакций, в которых участвовало слабое взаимодействие, постепенно расширялся. Так, оказалось, что именно им обусловлены распады  $\mu^\pm$ ,  $\pi^\pm$ -мезонов, странных частиц и т. п. Стремление продвинуться дальше и создать квантовую теорию сначала встретило большие трудности. Только сравнительно недавно удалось объяснить весь круг явлений в рамках единой теории электромагнитных и слабых взаимодействий.

### 7.5. Эзрико Ферми

Имя Ньютона окружено легендами. Самая известная из них о яблоке, упавшем с дерева и, якобы, явившемся толчком для открытия закона всемирного тяготения. Ее повторяли все, начиная от Вольтера и кончая веселыми героями М. Твена. Есть и менее распространенные легенды. Так, считается, что экспериментальные исследования Ньютона начались еще в школе, когда для измерения силы ветра он прыгал по ветру и против и сравнивал потом расстояния, которые преодолел.

«Техника» постановки этого эксперимента очень напоминает другой случай, происшедший уже в пятидесятые

годы нашего века. Поставлен опыт был по куда более серьезному (и тяжкому для человечества) поводу — атомному взрыву.

16 июля 1945 г. на юге штата Нью-Мексико американские ученые и военные произвели первый взрыв атомной бомбы. Наблюдатели были ослеплены вспышкой света, а через тридцать секунд до них докатилась ударная волна воздуха и «чудовищный рев». Только один человек не слышал звука взрыва — Энрико Ферми.

«Все его внимание было поглощено тем, что он бросал маленькие клочки бумаги и наблюдал, как они падают. Как он и ожидал, воздушная волна, последовавшая за взрывом, подхватила их и понесла за собой. Они упали на некотором расстоянии от Энрико. Он смерил шагами это расстояние и таким образом определил длину их пути. А отсюда он уже мог вычислить силу взрыва. Его цифры совпали с показаниями точных приборов и счетчиков», — писала в своих воспоминаниях Лаура Ферми.

Имя Ферми тоже окружено легендами. Конечно, значительно более достоверными. За свою жизнь он выпустил не так много работ, но любая из них — новое слово в физике. Ферми была свойственна необычайная универсальность: создатель теории бета-распада, он руководил пуском первого в мире атомного реактора; специалист по квантовой теории поля через короткий промежуток времени превращался в экспериментатора, исследующего взаимодействие нейтронов с веществом, и т. п. Возможно, что лучше всех о своем учителе написал Б. Понтекорво. Мы окончим рассказ о Ферми словами из его статьи:

«Ферми всегда находил наиболее простые подходы к решению самых сложных практических задач. Что же касается исследований фундаментального характера, то избранные Ферми большие проблемы становились всегда простыми, хотя эта простота, конечно, появлялась только после того, как он их блестяще разрешал.

Стремление к простоте было одной из характернейших черт его личности. Однажды после семинара, на котором выступали теоретики, ... Ферми сказал Сегре, что был совершенно подавлен своей неспособностью понять, о чем идет речь, и только последняя фраза — «Вот в этом и состоит фермиевская теория бета-распада» — несколько утешила его».

## 7.6. Вопросы и задачи

25. Посмотрите таблицу элементарных частиц, приведенную в конце книги, и на основании данных о распаде заряженных и нейтрального  $\pi$ -мезонов оцените относительную интенсивность слабого и электромагнитного взаимодействий в этих распадах.

26. Вначале физики предполагали, что масса покоя нейтрино не сильно отличается от массы электрона. Скажем, составляет  $0,1 m_e$ . Во сколько раз скорости частицы в этом случае меньше скорости света при  $E_\nu = 1$  МэВ?

27. На рис. 14 изображен спектр электронов, испускаемых при бета-распаде. А как будет выглядеть спектр нейтрино?

## ДЕТЕКТОРЫ И НЕЙТРИНО

### Глава 1

### СЦИНТИЛЛЯТОРЫ И ОТКРЫТИЕ НЕЙТРИНО

#### 1.1. Как зарегистрировать нейтрино?

В юности Паули был очень дружен с астрономом Вальтером Бааде. Какое-то время они даже жили в одном доме. И вот, однажды вечером взволнованный Паули вошел к другу со словами: «Я сделал сегодня что-то ужасное. Физику-теоретика никогда не следует делать такого. Я предположил нечто, что никогда нельзя будет проверить экспериментально». Как догадывается читатель, речь шла о нейтрино. Бааде тут же сообразил, что можно предложить Паули совершенно беспроблемное пари на бутылку шампанского. Он стал утверждать, что нейтрино будет зарегистрировано при их жизни. Беспроblemное, поскольку, если бы нейтрино было зарегистрировано после смерти спорщиков, Паули не смог бы воспользоваться выигрышем и отведасть свой любимый напиток.

Сразу скажем, что оптимизм победил, шампанское было выпито вместе с экспериментатором, который зарегистрировал нейтрино. Вся эта история была рассказана на одной из физических конференций, уже после смерти Паули.

Глава, к которой мы приступаем, служит читателю доказательством, что, будучи слабым спорщиком, Паули был, без сомнения, великим физиком.

Какие доказательства существования нейтрино требовались для того, чтобы оно стало полноправным членом семейства элементарных частиц; таким же, как электрон, протон или гамма-квант? Ведь казалось, что опыты, сделанные уже через 2—3 года, еще раз подтвердили, что в бета-распаде участвует «нечто», уносящее энергию и импульс.

Многими экспериментаторами была проверена и теория Ферми, в которой нейтрино играло основополагающую роль. Но все это были лишь косвенные свидетельства. «Нейтрино» всё еще могло оказаться просто удобной игрой слов, скрывающей за собой нарушение законов сохранения в слабом взаимодействии. Однозначное доказательство мог дать эксперимент, в котором эта частица была бы зарегистрирована вдали от точки своего рождения. Найти недостающую энергию в другом месте и означало доказать вещественность, физическую реальность частицы, переносящей ее.

Выполнить такой эксперимент представлялось необычайно трудным. Ведь теория предполагала, что у нейтрино ничего нет — нет массы, заряда, магнитного момента. Оно не может ионизировать или возбуждать атомы, а детекторы элементарных частиц чувствительны именно к электромагнитным процессам. Конечно, оставались лазейки такого сорта: вдруг у нейтрино есть маленький заряд, много меньший заряда электрона? (В это никто не верил, так как все верили в закон сохранения заряда.) Или, вдруг у нейтрино есть магнитный момент, но тоже очень малый (в это поверить было легче)?

Если же ни того, ни другого нет, то нейтрино — «чистый» представитель слабых сил, без всяких электромагнитных свойств. Оно может себя обнаружить, только если путем слабого взаимодействия передаст часть энергии заряженным частицам и уже те будут зарегистрированы. Оставалось найти подходящий процесс.

И вот, в 1934 г. предложили использовать для обнаружения нейтрино реакцию, при которой оно взаимодействует с водородом (с протонами) и рождает нейтрон и позитрон:



Реакция эта по многим признакам была очень привлекательна.

Во-первых, она обязана была происходить (а про многие другие процессы с нейтрино это заранее известно не было). Согласно общим физическим принципам, если возможен процесс (29) — распад нейтрона на протон, электрон и нейтрино, то обязательно существует и обратная ему реакция (32).

Во-вторых, теория Ферми предсказывала, что в потоке нейтрино небольших энергий, скажем, излучаемых при

β-распаде ядер, вероятность этого процесса гораздо больше, чем любого другого.

В-третьих, две частицы, которые вылетают в результате реакции, достаточно «колоритны» и можно надеяться их зарегистрировать. Реакция (32) имеет энергетический порог. Это значит, что она идет только в том случае, если энергия нейтрино превышает 1,8 МэВ. Рассчитать этот порог несложно: к разнице масс протона и нейтрона 1,3 МэВ надо прибавить массу покоя образующегося позитрона 0,5 МэВ. Получается 1,8 МэВ.

Теперь оценим вероятность такого обратного процесса. Если считать, что мы обладаем источником, излучающим поток нейтрино с энергией 3 МэВ, и этот поток падает на мишень, например, кубометр воды (в воде достаточно большая концентрация протонов), то из  $10^{18}$  частиц — из миллиона триллионов частиц — лишь одна прореагирует в такой мишени. Все познается в сравнении. Так вот, из ста гамма-квантов той же энергии с водой взаимодействуют 99. Трудно сказать, что эти цифры были обнадешивающими.

Хотя погоня за нейтрино началась сразу же после того, как Паули открыл эту частицу («на кончике своего пера»), ждать ее результатов пришлось двадцать лет. За это время методы ядерной физики совершенно преобразились.

Во-первых, были созданы мощные источники нейтринного излучения. И мы о них будем вкратце говорить. Во-вторых, появились чувствительные детекторы, содержащие большое количество вещества — несколько кубометров. Об этом мы поговорим более подробно. Наконец, экспериментаторы изобрели методы подавления фона. Ведь другие частицы, попадая в нейтринный детектор, тоже регистрируются. Из примера, который был приведен выше, видно, что его чувствительность к гамма-излучению на 19—20 порядков больше, чем к нейтрино. И нужные реакции вполне могут остаться незамеченными среди массы других процессов. Потребовалась многолетняя работа для того, чтобы научиться выделять нейтринные события среди фоновых по их специфическим особенностям. Поэтому нам не избежать знакомства с источниками фона в нейтринных экспериментах. Начнем по порядку.

## 1.2. Ядерные реакторы — источники нейтрино

Первые попытки зарегистрировать нейтрино делались при помощи источников, которые обладали естественной радиоактивностью. Опытов было сделано много. Часто в них использовались огромные (по тем временам) активности. В 1935 г. Намиас пытался определить число ионов, которые рождает нейтрино в воздухе. (А вдруг у частицы есть магнитный момент?) Он работал с источником, содержащим 5 г радия, и число нейтрино, излучаемых им во все стороны, составляло приблизительно  $10^{11}$  частиц в секунду. Ионизации Намиас не обнаружил. Из эксперимента следовало, что пробег частицы до взаимодействия с атомами воздуха больше, чем миллион километров, и, значит, ее возможный магнитный момент на много порядков меньше, чем у электрона.

2 декабря 1972 г. под руководством Э. Ферми в Америке был пущен первый ядерный реактор. В Советском Союзе запуск реактора был осуществлен 25 декабря 1946 г. Руководил работами Игорь Васильевич Курчатов. Наступила новая эра в физике и технике и она, конечно, коснулась нейтрино.

В реакторе, после захвата нейтрона, ядро урана-235 (или плутония-239) делится на два осколка. Образовавшиеся осколки сначала излучают нейтроны, потом гамма-кванты и процессы эти идут за очень короткие времена. Потом приходит черед бета-распадов.

В среднем каждый из осколков претерпевает  $\beta$ -распад три раза и, следовательно, при одном делении излучается шесть нейтрино. Их энергии простираются от 0 до 10 МэВ, но относительное число частиц с большой энергией очень мало. Если мощность реактора составляет 4000 МВт (не особенно много по современным масштабам), то в окружающее пространство каждую секунду испускаются  $N = 2 \cdot 10^{20}$  нейтрино. Около 50 МВт мощности уносится этим излучением, для которого стены, защита, бетонные плиты да и сам земной шар — абсолютно прозрачны, так что выражение «обогреть улицу» здесь вполне уместно заменить более сильным «обогреть Вселенную».

На детектор, расположенный на расстоянии  $R = 10 \div 15$  м от активной зоны реактора, падает поток

нейтрино, равный  $\sim 10^{13}$  частиц через  $1 \text{ см}^2$  в секунду \*). Расположить детектор ближе очень трудно из-за необходимости защиты от других видов излучения реактора.

Физики получили в свои руки мощный источник нейтрино. Теперь дело было за детекторами. Их развитие шло непрерывно и для обнаружения  $\nu$  были испробованы самые разные типы таких приборов, пока не стало ясно, что успехов следует ожидать от сцинтилляционного метода.

### 1.3. Немного истории

В темной комнате сидит человек. Он склонился над небольшим прибором, наблюдая через лупу вспышки света на экранчике из сернистого цинка. Таким способом он считает альфа-частицы от радиоактивного препарата, расположенного в нескольких миллиметрах от экрана. Свет, вызываемый одной частицей, столь слаб, что исследователю приходится часами просиживать в темноте, чтобы приучить глаза хорошо различать его.

Это первый из детекторов элементарных частиц, носящий название сцинтилляционного Крукса. Именно с его помощью открыто атомное ядро. Конечно, такой прибор был пригоден только для счета редких событий, самое большее, — двух в секунду. Невозможно было и вести наблюдение достаточно долго. Резерфорд вспоминал, что он не мог выдержать больше, чем две минуты, потом глаза начинали слезиться от напряжения и приходилось отдыхать. Чемпионом лаборатории в этом виде спорта считался Гейгер. Но он пренебрег своими чемпионскими лаврами и изобрел газоразрядный счетчик — счетчик Гейгера, надолго вытеснивший из практики метод вспышек, названный сцинтилляционным \*\*).

В 1944 г. Керран и Бейкер приспособили для счета сцинтилляций электронный прибор фотоумножитель (ФЭУ), регистрирующий световые вспышки. Фотоумно-

\*) Здесь вступает в действие закон обратных квадратов расстояний. Поскольку нейтрино ничем не задерживаются, то их поток  $h$  через  $1 \text{ см}^2$  в  $1 \text{ с}$

$$h = \frac{N}{4\pi R^2} = \frac{2 \cdot 10^{20}}{4\pi (1500)^2} = 3 \cdot 10^{13}.$$

\*\*) Сцинтилляция (англ.) — искрение, вспышка света.

житель обладал несомненными преимуществами по сравнению с человеком — быстротой, надежностью и большей чувствительностью. Свет от каждой из частиц преобразовывался в электрический импульс и затем специальная электронная аппаратура считала эти импульсы. С этого момента возрожденный метод сцинтилляций начал свое триумфальное шествие в ядерной физике и физике элементарных частиц.

В 1947 г. Кальман заменил экран из сернистого цинка прозрачным для собственного излучения кристаллом нафталина. Теперь свет шел не с поверхности, а из всего объема кристалла. Стало возможным регистрировать не только короткопробежные альфа-частицы, но и бета- и гамма-излучение. Правда, последнее плохо поглощалось в нафталине, слишком мала величина  $Z$  у этого вещества ( $Z = 6$  для углерода). Но новые открытия не заставили себя ждать и уже в 1948 г. Хофштадтер обнаружил, что кристалл иодистого натрия  $\text{NaI}$  (эффективное  $Z = 50$ ) с небольшими добавками таллия является прекрасным сцинтиллятором для гамма-излучения и дает очень сильную световую вспышку. За короткое время было разработано множество видов сцинтилляторов. Органические: кристаллы, жидкости, пластики. Неорганические — кристаллы. Появились специальные детекторы нейтронов. Сцинтилляционный метод нашел множество разнообразных применений. Сейчас он используется в геологии, медицине, сельском хозяйстве и т. д.

#### 1.4. Как энергия частиц преобразуется в свет

Уже знакомая нам картина прохождения заряженной частицы через вещество — в ее следе возбужденные и ионизированные атомы. При переходе в основное состояние возбужденные атомы могут излучать кванты, а ионизированные — захватывать электроны (рекомбинировать) и тоже излучать. Таким образом, часть энергии, потерянной частицей, преобразуется в свет. Для сцинтиллятора важно, чтобы эта часть была достаточно велика и чтобы свет не поглотился в веществе, а вышел за его пределы и попал на фотоумножитель. Процессы преобразования энергии частицы в свет сильно различаются для органических и неорганических сцинтилляторов. Они достаточно сложны, так что целый ряд

невыясненных деталей до сих пор привлекает внимание ученых.

Мы ограничимся описанием очень простой модели. Она относится к органическим сцинтилляторам, для которых важно, что происходит с отдельной молекулой. Другие молекулы слабо влияют на ее поведение. Качественно ничего не изменится, если рассмотреть всего

двухатомную молекулу и попытаться понять, каким образом излучаемые ею кванты сразу же не захватываются другими такими же молекулами.

На рис. 15 представлена зависимость потенциальной энергии молекулы II от расстояния  $r$  между атомами. Кривая I соответствует основному состоянию молекулы и имеет знакомый (вспомним задачу двух тел) вид. Поскольку атомы в молекуле совершают колебания, то нижний уровень полной энергии  $E$  — нижний колебательный уровень (изображен отрезком  $ab$ ).

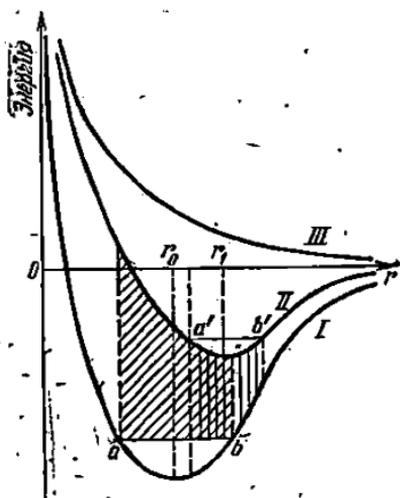


Рис. 15. Уровни энергии двухатомной молекулы.

Средняя кривая II — потенциальная энергия возбужденной молекулы. В ней расстояние между атомами стало больше ( $r_1 > r_0$ ), потенциальная яма уже не так глубока. Ее нижний колебательный уровень  $a'b'$ . Наконец, верхняя кривая III соответствует такому возбуждению, при котором атомы могут разойтись на сколь угодно большое расстояние, и молекула распадается.

Набор энергий квантов, которые могут перевести молекулу из основного состояния в возбужденное, изображен полосой на рисунке (косая штриховка). Он определяется разностью ординат между кривыми  $ab$  и II. Если энергия фотона больше, и молекула попадает на высокие колебательные уровни, то через короткое время она отдаст часть энергии при соударениях с другими молекулами и окажется на уровне  $a'b'$ .

Переход из возбужденного состояния  $a'b'$  в основное (кривая I) определяет уже другой спектр-фотонов (прямая

штриховка). Видно, что он мягче и только часть квантов обладает достаточной энергией, чтобы возбудить соседнюю молекулу. В таком случае говорят, что спектр излучения молекулы *A* сдвинут относительно ее спектра поглощения *B* (рис. 16).

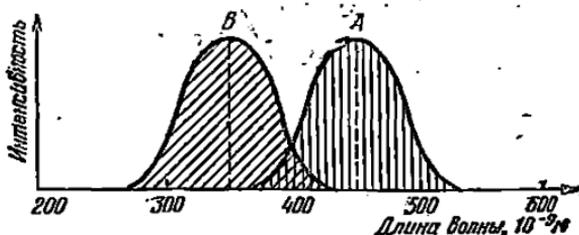


Рис. 16. Спектр излучения и спектр поглощения сцинтиллятора.

Отметим, что за счет сближения кривых *I* и *II* существует вероятность, что молекула перейдет из возбужденного состояния в основное без излучения кванта. Избыточная энергия перейдет в тепловое движение. Если бы спектры *A* и *B* полностью перекрывались, то после ряда испусканий и поглощений вся энергия перешла бы в тепло. Их несовпадение необходимо, чтобы использовать вещество в качестве сцинтиллятора.

Итак, часть энергии частицы  $E$  перешла в энергию света  $\Delta E$ , который может выйти за пределы сцинтиллятора. То, как велика эта часть, зависит от ряда факторов, в частности, от природы сцинтиллятора и вида частицы\*). Для электронов и наиболее «эффективного» кристалла — иодистого натрия  $\Delta E/E$  — около 10%, для кристалла антрацена ( $C_{14}H_{10}$ ) — 4%. Большинство жидких и пластических сцинтилляторов дают  $\Delta E/E$  в пределах (1 ÷ 2)%. Остальная энергия для регистрации теряется. Но то, что свет все-таки несет информацию об энергии, оставленной частицей, очень важно. Это позволяет прокалибровать счетчик источниками излучения с известной энергией и затем определить энергию исследуемых частиц. Как это выглядит практически, мы поговорим позже.

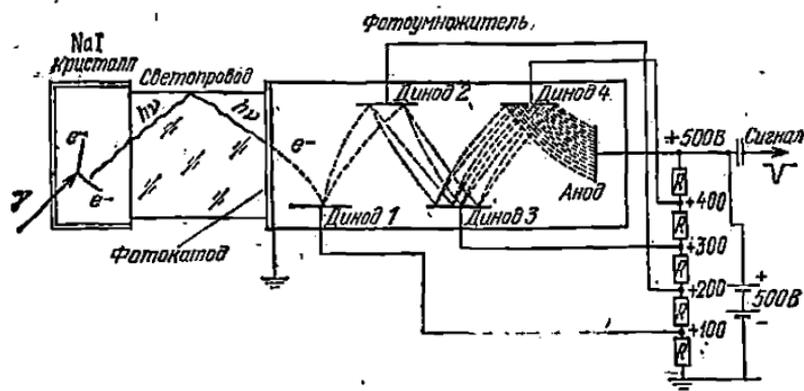
Время испускания сцинтиллятором квантов света после прохождения частицы достаточно мало. Для неорганических кристаллов основная часть квантов выле-

\*) Иногда и от энергии частицы. Пока мы не будем касаться этой возможности.

гает уже через  $10^{-8}$  с, для органических веществ — через  $10^{-8}$  с. Таким образом, можно регистрировать большие активности и не опасаться, что всплески от различных частиц наложатся друг на друга.

### 1.5. Современный сцинтилляционный счетчик

Проследим теперь последовательно, как энергия, оставленная частицей в сцинтиляторе, преобразуется в электрический сигнал. Для этого обратимся к рис. 17,



[Рис. 17. Современный сцинтилляционный счетчик.

на котором изображена схема современного сцинтилляционного счетчика с кристаллом NaI. Пусть сто гамма-квантов, испущенных радиоактивным препаратом — цезием-137, попадают в этот кристалл, и пусть они летят друг за другом узким параллельным пучком. Энергия каждого составляет  $h\nu = 661$  кэВ. Проследим за их судьбой. Каждый из квантов, как витязь на распутье, должен пойти по одному из трех путей: вызвать фотоэффект, испытать комптоновское рассеяние либо вылететь из кристалла, не провзаимодействовав. Только витязь выбирает свой путь, сообразуясь с желанием автора сказки, а вероятности процессов с гамма-квантами определяются их энергией, материалом сцинтилятора и его размерами. Если взять кристалл толщиной  $\delta = 5$  см, то 9 квантов вызовут фотоэффект, 68 — рассеются, а 23 — пролетят сквозь кристалл, не оставив энергии. (Вообще, чем больше  $\delta$ , тем меньше вероятность третьего процесса, а от-

ношение первых двух зависит только от  $h\nu$  и  $Z$  кристалла). При фотоэффекте практически вся энергия кванта перейдет электрону, пробег которого очень мал ( $< 1$  мм). Таким образом, эта часть энергии сразу останется в сцинтилляторе.

Квант, испытавший комptonовское рассеяние, теряет, в среднем, 230 кэВ и после этого перед ним опять три возможности. Только теперь его энергия меньше и вероятность фотоэффекта выше. И т. д., и т. п. Процессы, которые мы описывали, происходят за время, гораздо меньшее времени высвечивания возбужденных молекул сцинтиллятора.

Теперь посмотрим на экран амплитудного анализатора — прибора, который позволяет нам как бы увидеть распределение энергий световых импульсов, возникающих в кристалле. Электронный луч рисует картину, представленную на рис. 18. Пик справа соответствует

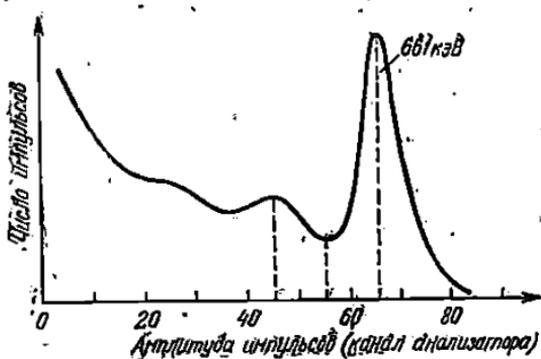


Рис. 18. Спектр энергии цезия-137 на экране амплитудного анализатора.

тому случаю, когда вся энергия гамма-кванта 661 кэВ осталась в кристалле. При этом световые импульсы близки по величине. Если же квант претерпел рассеяние и вылетел из кристалла, то импульсы света, рожденные комptonовскими электронами, будут иметь меньшую величину. Именно ими образован левый «хвост» спектра. Из этого ясно, как можно по пику полного поглощения прокалибровать энергетическую шкалу анализатора.

Вернемся к рис. 17. Кристалл помещен в тонкий металлический кожух, через который свободно проникают гамма-кванты, но не проходит свет. С одной стороны ко-

жука сделано стеклянное окно. С других сторон между ним и кристаллом находится отражатель, чаще всего белый порошок окиси магния. Такая конструкция помогает собрать на фотоумножитель как можно больше света.

Фотоумножитель — чувствительный прибор. Его работа нарушается при высоких или очень низких температурах, в области больших магнитных полей. Он может разрушиться при больших давлениях и т. п. Поэтому иногда возникает необходимость удалить кристалл от

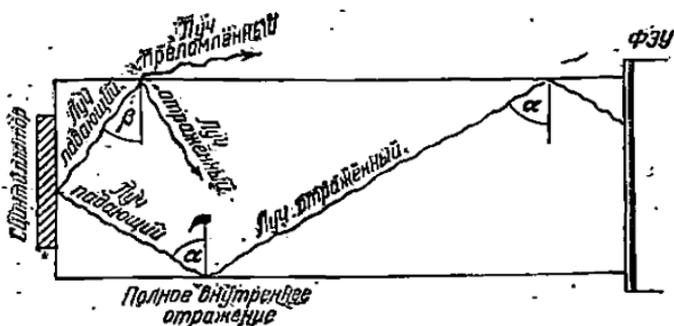


Рис. 19. Ход луча в светопроводе. Полное внутреннее отражение ( $\alpha$ -угол полного внутреннего отражения). При  $\beta \geq \alpha$  свет не выходит за пределы светопровода).

ФЭУ. В этих случаях используются светопроводы, один из которых представлен на рис. 17 и 19. Это сплошной цилиндр из прозрачной пластмассы с полированными поверхностями. Его торцы оптическим клеем соединены один — со стеклом кристалла, второй — с входным окном ФЭУ. Светопровод использует эффект полного внутреннего отражения. Луч света, падающий на поверхность раздела пластик — воздух под углом, большим, чем  $\alpha$  ( $\alpha$  — угол полного внутреннего отражения), уже не может выйти за пределы светопровода и после нескольких отражений попадает на фотокатод ФЭУ. Как это происходит, можно понять из рис. 19.

Итак, свет собирается через светопровод на входное окно фотоумножителя. Последний чаще всего представляет собой откачанный до высокого вакуума и запаиванный стеклянный цилиндр. С торца, противоположно входному окну, выведены контакты электродов.

Фотоумножитель в сцинтилляционном счетчике играет двойную роль — он преобразует световой импульс в электрический и затем усиливает этот электрический импульс.

В соответствии с этим в нем используются два физических явления — фотоэффект и вторичная электронная эмиссия. Квант света, пройдя через стеклянное (иногда кварцевое) окошко ФЭУ, попадает на нанесенный с внутренней стороны полупрозрачный слой — фотокатод. Сейчас разработано множество типов фотокатода, чаще всего они изготавливаются на основе соединений щелочных металлов с сурьмой. Такой слой особенно чувствителен к свету сцинтилляций, обладая малой работой выхода. Благодаря внешнему фотоэффекту, кванты выбивают электроны, которые разгоняются приложенным напряжением (и одновременно фокусируются) на промежутке до следующего электрода — 1-го динода. Поверхность динода покрыта слоем вещества, для которого велик коэффициент вторичной эмиссии  $\sigma$ , т. е. число электронов, выбитых одним падающим электроном. Величина  $\sigma$  зависит от энергии первичных электронов и при ускоряющем напряжении 100 В составляет  $\sim 3$ . Выбитые электроны летят ко 2-му диноду, ускоряясь приложенным напряжением, и история повторяется. Если ФЭУ имеет 10 динодов, то на последний электрод — анод приходит в среднем  $3^{10} \approx 6 \cdot 10^4$  электронов, вызванных всего одним электроном, вылетевшим из фотокатода. На рис. 17 показан и способ подачи напряжения на электроды ФЭУ с помощью источника ( $u \approx 500 \div 2000$  В) и делителя из сопротивлений. Электрический импульс с анода поступает на электронную схему и, в конце, на экран анализатора.

Сцинтилляционный счетчик сыграл большую роль в исследованиях по ядерной физике и физике элементарных частиц.

Можно перечислить целый ряд выдающихся экспериментов, где он был применен:

1. Открытие антипротона и антинейтрона (опыты Сегре и др.).
2. Регистрация нейтрино от ядерного реактора (опыты Рейнеса и Коузена).
3. Доказательство несохранения четности в слабых взаимодействиях (опыт Ву и др.).
4. Рассеяние нейтрино на электроне (опыт Рейнеса и др.).
5. Подземные эксперименты с космическими нейтрино.
6. Опыт по поиску двойного бета-распада и т. д.

## 1.6. Сцинтиллятор для нейтрино

Мы уже говорили, что пятидесятые годы — период бурного развития техники сцинтилляционного счета. Взоры физиков, занимающихся погоней за нейтрино, сначала обратились к жидким сцинтилляторам. Дело в том, что выращивать кристаллы, органические и неорганические, — сложное и дорогое дело. А их требуется очень много. Другое дело жидкости, хотя и с ними было много трудностей. В жидких сцинтилляторах лам растворитель (толуол, бензол, декалин и т. п.) обычно обладает лишь очень слабыми сцинтилляционными свойствами и в него необходимо ввести специальные добавки — активаторы, которые «перехватывают» энергию от молекул растворителя и эффективно превращают ее в свет. Отработка таких сложных по составу растворов заняла много времени. Кроме того, все компоненты жидкого сцинтиллятора должны были иметь высочайшую химическую чистоту, так что химикам и физикам хватало неприятностей, пока они учились получать жидкие сцинтилляторы в большом количестве.

Теперь нам осталось всего несколько страниц до начала нейтринного эксперимента, один шаг. Пропустить его нельзя, иначе невозможно понять красоту опыта, усилия и талант экспериментаторов.

Итак — о фонах.

## 1.7. Источники фона

Проблема фона волнует не только тех физиков, которые занимаются нейтрино. Да и не только физиков, но и химиков, биологов, техников. Точность любого измерения малой активности всегда зависит от того, насколько сильно удастся подавить фон. А чтобы его подавить, необходимо хорошо знать его природу, свойства фоновых частиц. Можно вспомнить достаточно много грустных случаев, когда неучтенный фон принимался за эффект, которого на самом деле не существовало. Это приводило к совершенно ошибочным результатам измерений. И рождались сенсации — иногда короткие, иногда такие, для опровержения которых требовались годы. Что греха таить, такие случаи можно найти и в истории нейтринных исследований и в экспериментах по бета-распаду. Если вы помните, мы говорили о том, что

теория Ферми несколько раз подвергалась пересмотру и ее «выправляли» и усложняли. Этому в немалой степени способствовал неправильный учет фоновых процессов. В конце концов, более совершенная аппаратура подтверждала гениальную интуицию Ферми.

Первая составляющая фона связана с космическим излучением. Мы уже говорили об его обнаружении по разрядке электроскопов и о тех неприятностях, которые это приносило физикам, занимавшимся в XIX веке опытами по электричеству (например, Ш. Кулону). Но вот, ученые выяснили причину фона.

Неуловимый вредитель стал для физиков верным союзником. До создания ускорителей элементарных частиц космические лучи являлись единственным источником излучения большой энергии. Опыты с ними позволили понять многие закономерности микромира и обнаружить новые элементарные частицы: позитрон,  $\mu$ - и  $\pi$ -мезоны. Интереснейшее явление — космические ливни — были исследованы и объяснены советскими физиками Д. В. Скобельцыным, Л. Д. Ландау, И. Е. Таммом и др. Позже мы еще вернемся к вопросу о космическом излучении, а сейчас оно будет интересовать нас лишь как источник фона в нейтринных экспериментах. Потoki частиц из космоса падают на границу земной атмосферы. Те из них, которые обладают достаточной энергией и могут избежать глубокой ловушки — магнитного поля Земли, устремляются к поверхности нашей планеты. И во взаимодействии с ядрами кислорода и азота рождают новые частицы.

Что же регистрирует наблюдатель в лаборатории? Он видит, что излучение разделяется на три компонента: электроны, позитроны и гамма-кванты — это мягкая компонента; частицы, которые участвуют в ядерном взаимодействии — нуклоны,  $\pi$ -мезоны — ядерная компонента; наконец, положительные и отрицательные  $\mu$ -мезоны — жесткая компонента. Уже сами названия подсказывают возможность защиты детектора от каждой из этих компонент. Мягкая — поглощается слоем свинца толщиной в 10—15 см (пассивная защита). Избавиться от ядерной компоненты труднее — для ее поглощения требуется 2—3 м железа или 15—20 м воды. Поэтому, если представляется такая возможность, детектор помещают в подземное помещение. Остаются мюоны больших энергий, глубоко проникающие под землю. Борьба с ними ве-

дятся с помощью так называемой активной защиты. Установку стараются окружить, особенно сверху, либо баками с жидким сцинтиллятором, либо пластинами из сцинтилляционной пластмассы, либо черенковскими или газовыми счетчиками. Мезоны, попавшие в основной детектор, с большой вероятностью проходят через детекторы активной защиты и регистрируются в них. Электронная схема следит за тем, когда импульсы от основного детектора и защитных совпадут по времени, и относит такое событие к фоновым. Полностью подавить мезонный фон не удастся, так как эффективность регистрации активной защиты не может быть 100%, но удастся уменьшить его в сотни и тысячи раз.

Теперь следует очень коротко рассказать о фоне естественной радиоактивности. Естественные радиоактивные элементы находятся в рассеянном состоянии во всех материалах установки, защиты, в воздухе и в самих экспериментаторах. (В последнем убедились тоже с помощью больших сцинтилляционных счетчиков, измерив радиоактивность человека. Она составляет около 3000 частиц в секунду.) В природе существуют три семейства элементов, обладающих естественной радиоактивностью: урана—радия, тория и актиния. Каждое семейство — это ряд атомов, претерпевающих последовательный распад и превращающихся в другие элементы, члены ряда. Есть еще и отдельные радиоактивные изотопы, создаваемые в атмосфере космическим излучением и не входящие в эти семейства. Наконец, есть очень неприятный для ряда экспериментов изотоп калий-40. Больше всего калия содержится в стеклах, в ФЭУ, в сопротивлениях делителя ФЭУ. В то же время для биологов калий-40 сущая находка, так как по его очень характерному излучению можно следить за изменениями радиоактивности человеческого тела. Это используется в тех случаях, когда человек подвергся облучению или находился в непривычных условиях, где его обмен веществ изменился, например, в космосе.

Можно представить себе вклад различных источников естественной радиации в фон, если обратиться к рис. 20. На нем представлен энергетический спектр фона кристалла иодистого натрия и спектры отдельных компонент фона, дающих вклад в общее число импульсов: космических мюонов, естественной радиоактивности — рядов тория и урана,  $^{40}\text{K}$ . От 4 до 9 МэВ наблюдаются пики от альфа-частиц внутренних загрязнений кристалла. Следует

обратить внимание на шкалу отсчетов — она логарифмическая. Это сделано для того, чтобы лучше показать фон в области высоких энергий. Иначе из-за того, что при переходе от энергии 0,5 МэВ к 3 МэВ он падает в 30 раз; масштаб не позволил бы это сделать.

Органические сцинтилляторы содержат значительно меньше радиоактивных загрязнений, чем неорганические кристаллы. Чаще всего их фон связан с внешней радиацией.

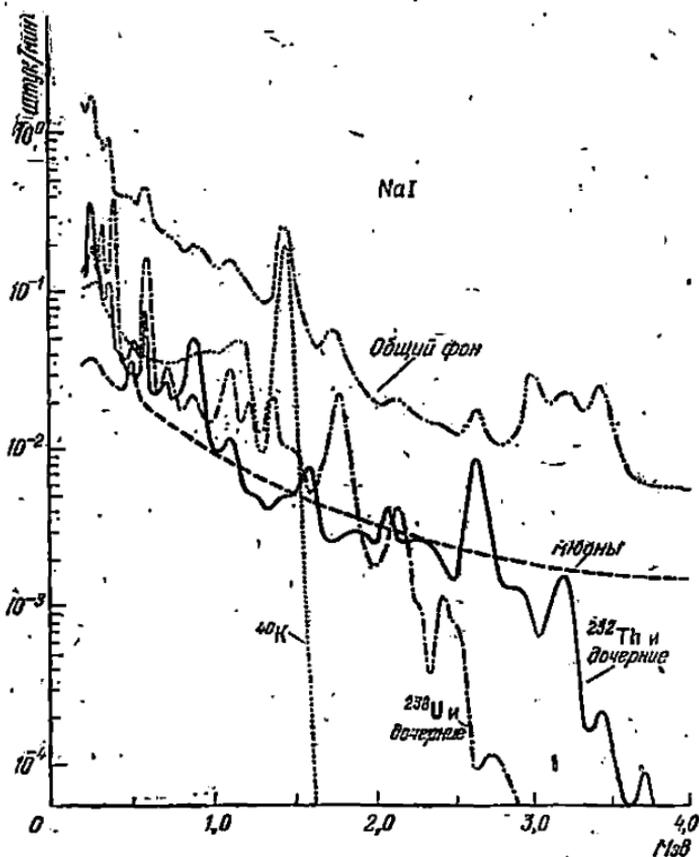


Рис. 20: Спектр фона от естественной радиоактивности и космических мюонов в кристалле иодистого натрия.

Третий вид фона связан с самим источником нейтрино. При делении осколков урана в активной зоне реактора излучаются самые разные частицы. Из них сквозь биологическую защиту проникают быстрые гамма-кванты и нейтроны. Если считать, что в защищенных помещениях

реактора число быстрых нейтронов в сто раз меньше предельно допустимой для персонала нормы, то вероятность их регистрации в детекторе с органическим сцинтиллятором все еще в миллион раз больше, чем для нейтрино. Это преимущество должно быть скомпенсировано дополнительной защитой. Ведь фон, связанный с работой реактора, — один из самых неприятных. Его нельзя измерить отдельно от эффекта, выключив реактор, как это делается для других видов фона. Он возникает одновременно с нейтрино и поэтому должен быть учтен особенно тщательно.

### 1.8. Долгожданная победа

Паули помогли проиграть пари два американских физика Рейнес и Коуэн, которые в 1953 г. впервые зарегистрировали нейтрино, вдали от места рождения этой частицы.

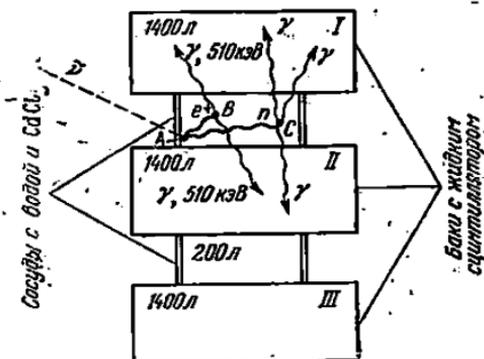


Рис. 21. Схема регистрации нейтрино в опытах Рейнеса и Коуэна (А — точка поглощения  $\nu$  и появления  $e^+$  и  $n$ , В — точка аннигиляции  $\beta^+$ , С — захват нейтрона ядром кадмия).

Для обнаружения  $\bar{\nu}$  они использовали реакцию, обратную бета-распаду нейтрона, которую мы обсуждали в начале этой главы:



Источником нейтрино служил мощный ядерный реактор в атомном центре Лос-Аламосе.

Чтобы понять принцип регистрации, обратимся к рис. 21. Нейтрино, летящее от реактора, попадает в мишень — пластиковый бак, наполненный двумястами лит-

рами воды. В воде растворена соль кадмия  $CdCl_2$ . При взаимодействии нейтрино с водородом (p) образуются нейтрон и позитрон. Последний практически мгновенно замедляется, аннигилирует с электроном среды, и два гамма-кванта, каждый с энергией 0,5 МэВ, разлетаются в противоположные стороны. Мишень была сделана достаточно тонкой, чтобы вылетевшие из нее кванты попали в баки с жидким сцинтиллятором, установленные по обе стороны от мишени. Каждый бак содержит 1400 л жидкости. Его внутренняя поверхность покрыта отражающим материалом, чтобы как можно больше света от сцинтилляции собралось на фотокатоде 110 фотоумножителей, которые «просматривают» бак. Для выравнивания светового потока ФЭУ отделены от сцинтиллятора светопроводами, материалом для которых служит чистый растворитель (без сцинтилляционных добавок).

Первое известие о регистрации нейтрино подадут одновременно зарегистрированные в детекторах аннигиляционные гамма-кванты с определенной энергией. Достаточно ли этого? Оказывается, — нет. Несмотря на то, что детектор был защищен свинцом и бетоном, число фоновых импульсов, имитирующих появление позитрона в мишени, все еще в десятки раз превышало ожидаемый эффект.

Поэтому пришлось прибегнуть и к «услугам» нейтрона. Он быстро замедляется в воде — за несколько миллионных долей секунды и захватывается ядром кадмия. Кадмий потому и был введен в состав мишени, что с очень большой вероятностью захватывает медленные нейтроны и в результате этого процесса излучает несколько энергичных гамма-квантов. Последние также попадают в сцинтилляционные детекторы и регистрируются.

Теперь нейтринное событие может быть отделено от фона по следующим признакам:

1. В детекторах одновременно возникают импульсы, соответствующие по энергии аннигиляционным квантам.

2. Через определенное время в детекторах, тоже одновременно, появляются импульсы, величина которых лежит в заданном диапазоне. Они связаны с захватом нейтрона ядром кадмия.

Определенные энергии, совпадение по времени, задержка между первым и вторым событием, — все эти особенности реакции (32) позволили успешно подавить фон и зарегистрировать нейтрино. В эксперименте ис-

пользовались две водные мишени и между ними три сцинтилляционных детектора. Общая масса установки, кроме внешней свинцовой защиты, превышала 10 т, а счет полезных событий составлял всего лишь 1,7 штуки за час, т. е. 40 штук в сутки! Вместе с тем полное число реакций (32) в 400 л воды должно было быть около 2000. Такое уменьшение эффекта произошло потому, что в борьбе с фоном пришлось ввести слишком много критериев отбора полезных событий, и, тем самым, снизить эффективность регистрации нейтрино. Простой пример. Аннигиляционный гамма-квант может потерять часть своей энергии в водной мишени, может уйти из сцинтилляционного детектора, оставив в нем только часть энергии. Поскольку отбираются такие события, импульс от которых соответствует потерям энергии в детекторе 0,5 МэВ, электронная схема его не считает.

Эффективность регистрации нейтрино рассчитывалась и проверялась в контрольных экспериментах. Опытов было проведено очень много. Например, для определения наиболее опасной компоненты фона — фона от реактора, между активной зоной и установкой помещалась массивная дополнительная защита. Поток всех частиц, кроме нейтрино, ослабляется этой защитой. И если наблюдаемые события все-таки каким-либо хитрым образом имитируются ими, то число таких событий уменьшается. Результат успокоил физиков — величина эффекта осталась на уровне 40 штук в сутки. Эксперимент, вместе с контрольными опытами, длился 2085 часов, т. е. около трех месяцев чистого времени.

Точность опыта была не очень велика, но позволила утверждать, что вероятность взаимодействия нейтрино с протоном находится в согласии с предсказаниями теории Ферми. (Отметим, что именно работы Рейнеса и Коузена по созданию нейтринного детектора открыли путь в физику, биологию и другие науки счетчикам, содержащим большие объемы жидкого сцинтиллятора. Примером может служить один из детекторов радиоактивности человеческого тела. В таком счетчике человек помещается в трубу длиной около двух метров. Стенки трубы двойные и между ними находится слой жидкого сцинтиллятора, толщиной 15 см. Более ста фотоумножителей регистрируют световые вспышки от гамма-квантов калия-40.)

В течение 1959—1968 гг. группа физиков во главе с Рейнесом уточняла экспериментальные результаты ис-

следования реакции (32). Одновременно с этим была начата подготовка к другим опытам с реакторными нейтрино: поискам процесса рассеяния нейтрино на электроне ( $(\nu)(\nu')$ -взаимодействие) и изучения взаимодействия  $\nu$  с ядром атома тяжелого водорода — дейтоном. В первом случае был создан уникальный по чувствительности сцинтилляционный детектор, о котором мы кратко расскажем на следующих страницах.

### 1.9. Нейтрино рассеивается на электроне

На столе лежат два томка с заголовками «Библиография нейтрино». В них собраны названия всех статей, посвященных этой частице, за промежуток времени в тридцать лет.

1930 г. Первое письмо Паули, единственная работа в этом году.

1934 г. Кроме работы Ферми по теории бета-распада, еще 20 статей. Популярность загадочной частицы растет и эта загадочность подталкивает ученых на создание самых смелых гипотез. Например — «Нейтринная теория света» (довольно много работ).

1936 г. Еще одно косвенное доказательство существования нейтрино — работа советского физика А. И. Лейпунского. В его опыте было качественно показано, что ядра терпят отдачу при  $\beta$ -распаде таким образом, что ее нельзя объяснить вылетом только одной заряженной частицы.

Обнаружение свободного нейтрино — 1953 г. Кроме знаменитой статьи Рейнеса и Коуэна еще около 60 работ.

Но вот все сильнее начинает звучать новая тема в нейтринной физике — обсуждение возможности рассеяния нейтрино на электроне. Среди 236 книг и статей 1964 г. многие касаются этого процесса. В том же году опубликована и книга академика М. А. Маркова, в которой мы читаем:

«Хотя подробный анализ возможностей, открываемых существованием  $(\nu)(\nu')$ -взаимодействия, очень напоминает дележ шкуры убитого медведя, все же обсуждение различных порождаемых взаимодействием эффектов эвристически очень ценно.

...Хотим мы этого или не хотим, но тенденции в развитии физики слабых взаимодействий привели к тому, что детектирование пока выдуманного  $(\nu)(\nu')$ -взаимодейст-

вия становится экспериментальной проблемой фундаментальной важности».

Реакция эта выглядит так:



т. е. ожидается, что налетающее нейтрино рассеивается на электроны, теряя часть своей энергии ( $\bar{\nu}'$  — обозначает нейтрино с меньшей энергией, чем  $\bar{\nu}$ ). Если процесс обратного  $\beta$ -распада (эксперимент Рейнеса и Коуэна) вытекает из самых общих физических принципов, то о существовании рассеяния нейтрино на электроны заранее известно было гораздо меньше. Конечно, физикам очень хотелось, чтобы по аналогии с электродинамикой слабые силы приводили к своеобразному комптон-эффекту, в котором роль гамма-кванта играло бы рассеивающееся нейтрино. Тогда открывалась возможность для массы интереснейших процессов (например, рождение электрон-позитронных пар летящим нейтрино), важных для физики элементарных частиц и астрофизики.

Реакция (33) была достоверно обнаружена через двадцать три года после опытов Рейнеса и Коуэна и через четырнадцать лет после того, как идея регистрации была опубликована Рейнесом. Все эти годы шло создание и усовершенствование детектора, накопление экспериментальных результатов.

Вероятность  $(\bar{\nu}e^-)(\bar{\nu}'e^-)$ -рассеяния для реакторных нейтрино в десятки раз меньше, чем вероятность процесса  $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$ . Продуктом реакции является электрон отдачи и это не позволяет использовать такую сложную систему отбора полезных событий и подавления фона, как это делалось в опыте Рейнеса и Коуэна.

Если рассмотреть хорошо защищенный столитровый сцинтилляционный детектор, расположенный в потоке нейтрино  $10^{13}\bar{\nu}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ , то число рассеяний нейтрино на электроны составит в нем пять штук за час. А фон в области, где лежит основное число электронов, т. е. от 0,2 до 1,5 МэВ, будет в сто тысяч (!) раз больше. Вот количественная оценка трудностей, стоящих перед экспериментаторами, даже если предсказания верны.

Что же предложил Рейнес? Он считал, что лучше всего использовать для регистрации органический сцинтиллятор, который будет одновременно служить и детектором, и мишенью. Тогда фон будет обусловлен гамма-лучами из окружающей среды, а не внутренними загрязнениями,

как в случае, например,  $\text{NaI}$ . Разделение эффекта и фона может быть основано на различии между сигналом от гамма-квантов и сигналом от электронов отдачи, созданных антинейтрино. Точнее, на различии их пробегов в веществе. Схема центральной части установки, собственно, сам детектор пейтрино, изображена на рис. 22.

Пластический сцинтиллятор разделен на светоизолированные секции. Свет от каждой из них через светопровод из иодистого натрия и обычный светопровод попадает на фотоумножитель. Нейтринное событие — это сцинтилляционная вспышка в одной, и только одной, секции, поскольку пробег электрона с энергией в несколько  $\text{МэВ}$  с большой вероятностью целиком укладывается в пластическом сцинтилляторе.

Когда в установку попадает гамма-квант, то он, скорее всего, регистрируется в активной защите из иодистого натрия, который со всех сторон толстым слоем окружает пластик. Понятно, что когда это происходит в боковых охранных кристаллах, то система регистрирует его как фоновый импульс. А если сцинтилляция возникает в одном из светопроводов, то как отличить ее от импульса, вызванного нейтрино? Тогда используется тот факт, что световые импульсы от  $\text{NaI}$  и от пластического сцинтиллятора по характеру своего нарастания и спада во времени различны. Специальная электронная схема разделяет их и считает первый как фон.

Наконец, если гамма-квант провзаимодействовал в самом пластике, то с большой вероятностью это произойдет путем комптон-эффекта. Тогда рассеянный квант еще раз зарегистрируется в детекторе. А любые двойные события считаются связанными с фоном.

Детектор был окружен пассивной защитой — свинцом и кадмием (для поглощения нейтронов). Внешняя

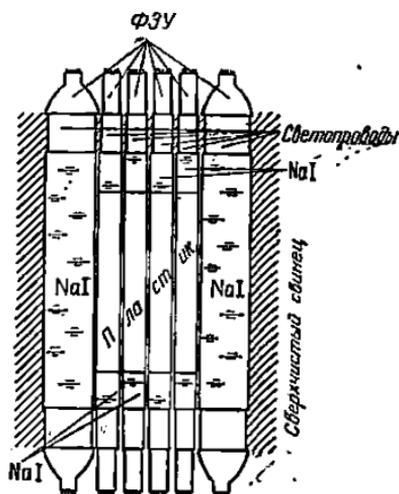


Рис. 22. Схема установки в опытах группы Рейнеса по наблюдению рассеяния антинейтрино на электроны.

активная защита представляла собой бак, содержащий более двух тонн жидкого сцинтиллятора, в который и опускалась вся установка. Все эти меры позволили в десятки раз подавить фон и обнаружить эффект.

При включенном реакторе счет одиночных событий составлял 47 штук/сутки, при выключенном — 40. Разность между ними 7 штук/сутки — нейтринные события. Можно было считать доказанным существование этого интересного процесса. Нам остается сказать, что наблюдение рассеяния нейтрино на электроны — одно из самых высших достижений сцинтилляционной техники и техники регистрации малых активностей.

### 1.10. Вопросы и задачи

28. Как вы уже знаете, некоторые косвенные доказательства существования нейтрино были получены А. И. Лейпунским в 1936 г. Они носили качественный характер. Позднее А. И. Алиханов и А. И. Алиханян предложили поставить следующий эксперимент. При электронном захвате из ядра вылетает только одна частица — нейтрино. Естественно, что ядро терпит при этом отдачу — летит в сторону, противоположную вылету этой частицы. Все нейтрино имеют одну энергию и ядра отдачи — тоже. Их можно зарегистрировать и эту энергию измерить. Эксперименты советским физикам осуществить не удалось из-за начавшейся войны. В 1942 г. американец Аллен использовал такую же идею и поставил опыт с изотопом бериллий-7. Он получил энергетическое распределение ядер в полном соответствии с предсказаниями расчета. Оцените, какая энергия уносится ядром, если полная энергия, выделяющаяся при распаде, составляет  $E_0 = 0,864$  МэВ. (Используйте релятивистское соотношение между импульсом и энергией нейтрино  $E_\nu = p_\nu c$  — такое же, как для  $\gamma$ -кванта.)

29. Система активной защиты состоит из пластин органического сцинтиллятора. В центре одной из них происходит вспышка от зарегистрированной частицы. Оцените, какая часть света останется в пластине и может быть собрана на фотоумножителе, стоящие по обе торцам. Используется полное внутреннее отражение (ПВО). Показатель преломления вещества пластины  $n = 1,6$ .

30. Сцинтилляционный кристалл имеет форму цилиндра диаметром 10 см. А диаметр катода фотоумножителя — 5 см. Их решили соединить светопроводом из органического стекла. Пусть число фотонов, попавших из кристалла в светопровод, равно 100. Какой формы должен быть последний, чтобы 50 фотонов собрались на катоде ФЭУ?

31. Емкость анода ФЭУ относительно Земли составляет  $C = 100$  пФ. Найти, до какого потенциала она зарядится после прихода на фотокатод  $f = 100$  квантов света. Известно, что

- 1) один квант света выбивает из фотокатода в среднем 0,15 электронов;
- 2) коэффициент вторичной эмиссии динодов  $\sigma = 3$ ;
- 3) число динодов = 12.

32. Установку защищают свинцом от космического излучения. С увеличением слоя свинца интенсивность этого излучения меняет-

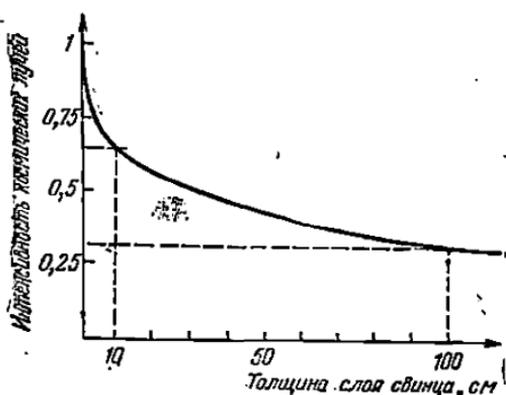


Рис. 23.

ся так, как показано на рис. 23. Объясните поведение кривой на графике.

33. Какие свойства нейтрино кажутся совершенно необъяснимыми с точки зрения классической физики?

## Глава 2

### РАДИОХИМИЯ, СОЛНЦЕ И НЕЙТРИНО

#### 2.1. Опять немного истории

В этой главе мы познакомимся с экспериментами, в которых ученым удалось извлечь из большого объема вещества ничтожные количества радиоактивного изотопа. В опытах использовались химические и физические методы разделения и история их насчитывает уже более восьмидесяти лет. Пионерами в этой области были Мария и Пьер Кюри. Как уже знает читатель, они сумели извлечь радий из отходов урановой руды — десятую долю грамма из нескольких тонн породы. Они же первые ввели в практику радиометрический контроль за тем, насколько хорошо и полно происходило это извлечение. Исследователи использовали то, что с увеличением концентрации радия в препаратах увеличивалась радиоактивность. В качестве детектора применялся заряженный электрометр — чем больше был ток разрядки, тем сильнее была ионизация воздуха и, следовательно, больше радия в пробе.

Рассказывая об этих ученых, невозможно не сказать о том, что их работа, продолжавшаяся четыре года, навсегда останется в истории физики примером самоотверженного и бескорыстного труда. Пьер и Мария Кюри преодолевали трудности, связанные не только с разработкой методов извлечения неизвестного до сих пор элемента, да еще содержащегося в исходном материале в столь ничтожных количествах; но и с отсутствием необходимых материальных средств, помещения, помощников. Оказалось, что в просвещенной европейской стране никому нет дела до этих опытов, и все расходы оплачивали сами Кюри из своих скудных сбережений. На просьбы о предоставлении хоть какой-нибудь лаборатории было отказано и работа велась в старом полуразвалившемся сарае. Мария Кюри писала в своих воспоминаниях: «Это был барак из досок с асфальтовым полом и стеклянной крышей, недостаточно защищавшей от дождя; без всяких приспособлений; в нем были только старые деревянные столы, чугунная печь, не дававшая достаточно тепла, и классная доска, которой так любил пользоваться Пьер Кюри». Иногда с утра и до позднего вечера Мария Кюри (взявшая на себя наиболее тяжелые операции извлечения) производила обработку первичного материала, окруженная клубами едких газов. Она переработала так восемь тонн урановой смоляной руды. А ведь имена супругов Кюри были достаточно известны среди французских ученых.

Не удивительно, что в книге, посвященной своим родителям, Ева Кюри с горечью вспоминает по этому поводу слова: «Республике не нужны ученые». Они были произнесены за столетие до описываемых событий и сопровождали смертный приговор одному из основателей современной химии — Антуану Лавуазье.

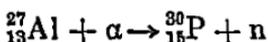
Уже в первый год работы Кюри обнаружили, что в урановой руде содержатся два новых радиоактивных элемента — полоний и радий, а к 1902 г. выделили чистый радий и затем определили его атомный вес  $A = 225$ . Так было положено начало методам извлечения и разделения радиоактивных препаратов. Методы начинают быстро развиваться.

Эстафету приняли Ирен Кюри (дочь Марии и Пьера Кюри) и ее муж Фредерик Жолио (после нескольких лет совместной работы они стали подписываться одной фамилией — Жолио-Кюри). Об их выступлении на VII Соль-

Сольвеевском конгрессе и об открытии искусственной радиоактивности мы тоже упоминали. Теперь расскажем об этом более подробно.

Супруги Жолио проводили эксперименты с полонием. Они хотели исследовать его бета-излучение и, чтобы поглотить мешающие им  $\alpha$ -частицы, поставили между источником и детектором алюминиевую фольгу. Альфа-частицы полностью поглотились алюминием, но теперь детектор регистрировал не только электроны, но и позитроны, которых полоний не излучал.

Об этом было доложено на Сольвеевском конгрессе. В дальнейших исследованиях обнаружилось, что если угести источник полония, то фольга еще некоторое время испускает позитроны. И тогда супруги Жолио-Кюри сделали смелый вывод:  $\alpha$ -частицы, бомбардирующие ядра, выбивают из них нейтроны, а сами поглощаются. В результате образуется новый радиоактивный изотоп фосфор-30. Он затем распадается, излучая позитроны. Реакция эта выглядит следующим образом:



п затем



После этого впервые были произнесены слова «искусственная радиоактивность». Но догадаться — это одно, а представить убедительные доказательства правильности своей догадки — совсем другое. И физики на время превратились в химиков, чтобы выделить образовавшийся фосфор из алюминия и получить тем самым необходимые доказательства. Сделать это было тем труднее, что радиоактивный изотоп распадался со временем жизни около трех минут, и извлечение его надо было производить достаточно быстро. Кроме того, выделить несколько радиоактивных атомов вообще невозможно. Однако можно сначала подмешать к ним весомое количество неактивного фосфора, обладающего абсолютно теми же химическими свойствами, а затем проводить извлечение. Фосфор-30 будет всюду следовать за своими стабильными «братьями» — атомами фосфора-31, которые потом получили название «носителей». Когда эта методика была осуществлена и все операции проделаны за время около трех минут, можно было праздновать победу. Детектор одно-

значно показывал позитронную активность выделенного фосфора.

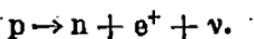
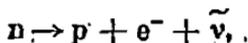
Открытие Жолио-Кюри как бы широко распахнуло двери перед исследователями. Число искусственных радиоактивных элементов, получаемых облучением  $\alpha$ -частицами и нейтронами, быстро возрастало. В Нобелевской лекции Фредерик Жолио-Кюри говорил о том, как возрос список таких элементов, начало которому было положено Марией и Пьером Кюри.

В дальнейшем методы радиохимии стали очень разнообразными. Вот, например, один из них. Мишень подвергалась облучению нейтронами, часть ее ядер захватывала их и переходила в более тяжелый изотоп с тем же числом протонов и с той же структурой электронной оболочки. Казалось, тождественность химических свойств материнских и дочерних ядер не позволяет их разделить. Но двое ученых, Сциллард и Чалмерс, обратили внимание на то, что если, скажем, облучать раствор марганцево-кислого калия, то марганец-55 после захвата нейтрона превращается в марганец-56, излучает гамма-кванты и в результате отдачи выскакивает из молекулы. Теперь, если профильтровать раствор, то радиоактивные атомы марганца-56 останутся на фильтре. Только сначала к раствору следует добавить немного нерастворимого посетителя, чтобы дальше иметь дело с осязаемыми количествами вещества. Таким способом удалось извлечь и хлор-38, и бром-80 и т. д.

Большие трудности возникли при извлечении плутония из облученного нейтронами урана. Плутоний был необходим для решения атомной проблемы, над которой в нашей стране работали многие ученые во главе с Игорем Васильевичем Курчатовым. Но это уже тема для отдельной книги. А нам пора возвратиться к нейтрину и рассказать о том, как используется радиохимия в экспериментах с этой частицей.

## 2.2. Опыты Дэвиса

Обратимся к бета-распаду одного из нуклонов ядра (реакции (29) и (30)):

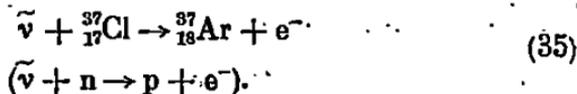


В первом случае ядро испускает электрон, во втором его античастицу — позитрон. Встает естественный вопрос, одинаковы ли  $\nu$  и  $\bar{\nu}$ , участвующие в этих процессах? Вообще говоря, у нейтрино должна быть античастица, но природа могла устроить и так, что  $\nu$  и  $\bar{\nu}$  тождественно совпадают. Это имеет, например, место для  $\pi^0$ -мезона или гамма-кванта. Второй вопрос связан с тем, какие же признаки отличают нейтрино от антинейтрино. Они обязательно должны определяться особенностями слабого взаимодействия, поскольку нейтрино не имеет ни заряда, ни магнитного момента.

Разрешить эти вопросы могли только эксперименты. Рассмотрим теперь реакции, обратные тем, которые мы только что приводили:

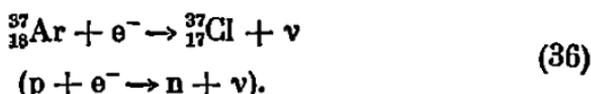


Вторая из них нам уже знакома (см. (32)). Это процесс, который наблюдали Рейнес и Коуэн в потоке  $\bar{\nu}$  от ядерного реактора. Если в этом потоке будет происходить и первая реакция (34), то можно сделать заключение о тождественности  $\nu$  и  $\bar{\nu}$ . И обратное — ненаблюдение такой реакции позволило бы утверждать, что  $\nu$  и  $\bar{\nu}$  — разные частицы. Мишени из свободных нейтронов в природе не существует. Процесс (34) можно пытаться наблюдать только на нейтронах, связанных в атомных ядрах. В случае, если  $\nu \equiv \bar{\nu}$ , ядро с  $Z$  протонами и  $N$  нейтронами должно превратиться в новое ядро, в котором нейтронов на один меньше, а протонов на один больше. При таком превращении вылетает один электрон и зарегистрировать процесс, например, сцинтилляционным методом — задача одного порядка сложности с обнаружением рассеяния нейтрино на электроне. Однако на помощь пришла оригинальная идея, высказанная в 1946 г. Б. Понтекорво. В качестве мишени он предложил использовать жидкость, содержащую хлор. Под действием нейтрино от реактора атом хлора-37 (опять-таки, если  $\nu \equiv \bar{\nu}$ ) должен превращаться в атом аргона-37:



Получившийся аргон — радиоактивен. Со временем жизни около 30 дней он распадается — испытывает электронный

захват. Это и есть прямая реакция:



Вы видите, что уравнения (35) и (36) обратны в том случае, если нейтрино и антинейтрино тождественны.

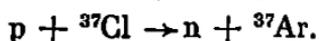
Аргон — инертный газ. Он не вступит в реакцию с веществом мишени, его можно пытаться извлечь, поместить в детектор и зарегистрировать.

Эксперименты были поставлены Р. Дэвисом и его сотрудниками. Они длились несколько лет сначала на Брукхейвенском реакторе (1955 г.), затем на реакторе в Саванна-Ривер (1956—1959 гг.). Оба реактора находятся в США. В течение этого времени методика извлечения из мишени и регистрации атомов аргона-37 постепенно усовершенствовалась, а сама мишень приобретала все больший объем.

Схема же эксперимента оставалась неизменной и состояла в следующем. Бак, содержащий до 11 м<sup>3</sup> перхлорэтилена (C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>) — жидкости, применяемой для чистки одежды, помещался под землей, недалеко от рабботающего реактора. В него предварительно вводилось около 1 см<sup>3</sup> обычного аргона. Газ служил носителем образующихся радиоактивных атомов.

Один, иногда два месяца жидкость выдерживалась для накопления радиоактивности, а затем начиналась процедура извлечения. В течение нескольких часов через объем бака пропускался гелий. Он в виде мелких пузырей проходил через жидкость и «вымывал» из нее атомы аргона. Затем гелий поступал в специальные ловушки, заполненные активированным углем и охлажденные до температуры жидкого воздуха. Аргон конденсировался и захватывался на поверхности угля, а гелий свободно проходил через ловушку. После нескольких циклов такого процесса ловушка отделялась от системы, соединялась с детектором и нагревалась. Уголь выделял захваченный аргон и последний поступал в миниатюрный счетчик (о нем мы будем говорить подробнее в следующей главе). Зарегистрированная в этих экспериментах активность была почти в десять раз меньше, чем ожидавшаяся в случае, если бы  $\nu \equiv \bar{\nu}$ . Она объяснялась фоновыми процессами, главным источником которых были быстрые космические частицы, попадающие в мишень и образующие

аргон-37 в результате ядерных реакций, например,



Итак, отрицательный результат экспериментов Дэвиса показал, что  $\nu$  и  $\bar{\nu}$  различны по своей природе, и оказался весьма важным для физики нейтрино. Такой случай, когда подтверждение одной теории ( $\nu \neq \bar{\nu}$ ) и опровержение другой ( $\nu \equiv \bar{\nu}$ ) связано с ненаблюдением какого-либо процесса, встречается не так часто. И поскольку речь зашла об экспериментах с отрицательным результатом, автор позволит себе ненадолго задержаться на этой теме.

### 2.3. Об эксперименте с отрицательным результатом

Однажды в лаборатории кто-то повесил лист ватмана. Каждый мог подойти к нему и написать то, что его волновало. В основном надписи демонстрировали знакомство сотрудников с писателями-юмористами. Отрывки из Гапсека («Вы меня знали с хорошей стороны, теперь вы меня узнаете с плохой стороны!»), из Марка Твена чередовались со смешными фразами из газет или просто с опечатками. Работала с новой установкой в основном молодежь и своеобразная «стенная газета» быстро пополнялась материалами. Но скоро стало не до смеха. Проходили недели, сначала одни загадочные полочки сменялись другими, не менее загадочными, потом установка начала наконец работать, но эффект, который все ожидали, так и не наблюдался. В это время и появилась на листе довольно известная поговорка: «Трудно поймать черную кошку в темной комнате. Особенно, если кошки там нет». Был поздний вечер, для работы уже не оставалось сил, а для шуток — оптимизма, и мы стали вспоминать о тех опытах, в которых что-то искали и не нашли, об экспериментах с отрицательным результатом. Конечно, не о самом простом и грустном их варианте, который связан с ошибками или систематическим невезением. Или, что уже совсем не зависит от экспериментатора, — неожиданным закрытием темы.

Речь шла о том, что отрицательный результат опыта часто указывает на то, что его точность еще не достаточно и поиск ведется не там, где надо, или посторонние причины маскируют явление. Тогда этот эксперимент —

лишь ступенька, которую необходимо либо преодолеть и продолжать дальнейшие исследования, вооружившись терпением и новой методикой, либо поставить знак «Проезд воспрещен» на одной из многих тропинок науки. Затем начали перечислять случаи, когда безуспешные поиски подготовили крупные открытия. И тогда я впервые услышал об истории открытия нейтрона.

3 июня 1920 г. Резерфорд выступил с лекцией в Королевском научном обществе и эта лекция вошла в историю физики, поскольку ученый предсказал в ней существование в ядре нейтронов, а в природе — тяжелых изотопов водорода, дейтерия и трития, и легкого изотопа гелия. Как вы знаете, до экспериментального открытия нейтрона должно пройти целых 12 лет. И в течение этих лет ученик Резерфорда — Дж. Чедвик, так же как и другие сотрудники лаборатории, искал пути обнаружения нейтральной частицы, входящей в состав ядра. Он получал отрицательные результаты, но его вера в правильность картины строения вещества, нарисованной учителем, не ослабевала. И это не пропало даром. Чедвик был внутренне готов к открытию нейтрона и открыл его. А первые ученые, наблюдавшие нейтроны, — немецкие физики Боте и Беккер, французы Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри не были готовы и не поняли природы этого излучения. Самы супруги Жолио-Кюри впоследствии писали об этом: «Большинство физиков, в том числе и мы, не обратили внимания на гипотезу Резерфорда. Но она все еще блуждала под сводами здания лаборатории Кавендиша, где работал Чедвик, и вполне естественно и справедливо, что последняя точка в открытии нейтрона была поставлена именно здесь. Идеи, высказанные когда-то нашими учителями, — как живущими, так и ушедшими от нас, — много раз вспоминаются и забываются в их лабораториях, сознательно или подсознательно проникая в мысли тех, кто постоянно там присутствует. Постепенно эти идеи созревают: тогда совершается открытие».

Отрицательный результат бывает важен, когда позволяет ограничить какую-то физическую величину. Пример — многочисленные опыты, в которых искалась масса нейтрино и получались все более точные ограничения на нее.

Наконец, вспомнили об экспериментах, отрицательный результат которых покоится в основании современной картины мира. Сразу же несколько человек произнес-

ли имя! Альберт Майкельсон. Первый из американских ученых, получивший Нобелевскую премию. Экспериментатор, посвятивший свою жизнь, по сути дела, одному опыту.

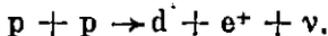
Двадцати шести лет он становится известным — младший лейтенант флота Альберт Майкельсон измерил с высокой точностью скорость света. Затем долгие годы ученый разрабатывал новые приборы и уточнял результаты своих измерений. Он стремился подтвердить теорию всепроникающего и неподвижного эфира, определить скорость «эфирного ветра», который дует на Земле при ее движении по орбите. И не обнаруживал такого ветра. Скорость света не зависела от движения Земли. Теория эфира был нанесен тяжкий удар. После одного из экспериментов автор, как бы оправдываясь, писал, что эффект не наблюдался и это, конечно, плохо, но опыт не бесполезен, хотя бы потому, что в ходе работы был изобретен новый интересный прибор — интерферометр. Прошло 18 лет. Альберт Эйнштейн создал специальную теорию относительности, одна из аксиом которой гласила: скорость света не зависит от системы отсчета. Говоря об опытах Майкельсона, Эйнштейн называл их «экспериментами, которые проложили дорогу для теории относительности».

Особенно много в тот вечер говорили о только что предпринятых группой Дэвиса попытках зарегистрировать солнечные нейтрино. В первых экспериментах они не были обнаружены и этот факт инициировал большое количество различных предположений и даже теорий.

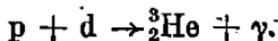
## 2.4. Поиски солнечных нейтрино

При огромных температурах (десятки миллионов градусов) и колоссальных давлениях глубоко в недрах звезд идут термоядерные реакции. Это реакции объединения, синтеза, когда «сгорает» водород и образуется гелий и более тяжелые элементы. Вот пример одного из циклов таких реакций:

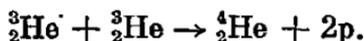
1. Два протона превращаются в ядро тяжелого изотопа водорода — дейтона:



2. Протон и дейтон образуют ядро атома гелия-3:



3. Два ядра гелия-3 сливаются и превращаются в гелий-4 и протоны:



Очевидно, что конечным результатом будет превращение четырех протонов в одно ядро гелия-4 — хорошо знакомую нам  $\alpha$ -частицу. В ней нуклоны упакованы очень плотно и у них значительная энергия связи. Поэтому в таком цикле выделяется энергия: основная часть в виде тепла — около 20 МэВ, и совсем малая часть уносится нейтрино. Вот такие реакции, как считают физики и астрофизики, и есть источники звездной энергии. Действительно, энерговыделение термоядерных процессов огромно. Для примера можно рассчитать тепло, выделяющееся при синтезе гелия из 1 г водорода. Его хватит, чтобы вскипятить небольшое озеро.

Детально разобраться в звездных процессах — очень важная и очень интересная задача.

Конечно, взоры ученых прежде всего обращаются к ближней из звезд — Солнцу. Оно легко доступно наблюдению, данные о поверхностном слое нашего светила получены и многократно проверены, но что происходит внутри? Сведения о термоядерных реакциях, протекающих там, можно получить лишь косвенным путем — любое излучение поглощается огромной массой звездного вещества. Кроме нейтринного излучения. Эти частицы проходят через все препятствия с такой же легкостью, как видимый свет сквозь чистое оконное стекло. Они несут информацию о внутризвездных процессах и могут быть зарегистрированы на Земле. Но хотя мы привыкли к тому, что величина эффекта в нейтринных экспериментах очень мала, в случае солнечных нейтрино эта малость побивает все прежние рекорды.

Это зависит не столько от интенсивности потока солнечных нейтрино, падающего на Землю (на каждый квадратный сантиметр поверхности планеты приходится приблизительно 50—80 миллиардов нейтрино в секунду), сколько от того, что энергетический спектр этих нейтрино очень мягкий. А чем мягче спектр — тем меньше вероятность взаимодействия  $\nu$  с веществом. Кроме того, для реакции, имеющей энергетический порог, может подходить лишь ничтожная доля полного потока нейтрино. Если использовать идею, предложенную Б. Понтекорво, — ведь Солнце излучает именно  $\nu$ , а не  $\bar{\nu}$ , как реактор, и они должны выз-

вать превращение хлора-37 в аргон-37, — то в тонне вещества за два года должны образовываться  $1 \div 2$  атома аргона!

И все-таки группа экспериментаторов во главе с Р. Дэвисом взялась за поиски солнечных нейтрино. Их опыты, начатые около пятнадцати лет назад, продолжают и в настоящее время, и с каждым годом растет статистика зарегистрированных частиц. Чтобы поставить такой эксперимент, прежде всего надо было избавиться от фона посторонних излучений. И здесь подходил только метод «грубой силы» — как можно глубже спуститься под землю, уйти от космического излучения. Поэтому установка располагается в шахте, где раньше добывали золото, на глубине около полутора километров под землей.

Эта огромная горизонтальная цистерна, которая вмещает  $3,8 \cdot 10^5$  л жидкости ( $C_2Cl_4$ ), окруженная толстым слоем воды, снижающим поток фоновых частиц от стенок шахты. Система извлечения аргона из гелия и его очистки от посторонних примесей занимает отдельный подземный зал.

Результаты первых измерений можно без преувеличения назвать обескураживающими — уровень активности, предсказываемый астрофизиками, в десятки раз превышал тот, что наблюдался в эксперименте. Куда же пропали нейтрино? Сначала забурили физические конференции и резко увеличилось число журнальных статей о солнечных нейтрино. Потом переполох перекинулся в популярные издания и даже вечерние газеты. «Идут ли термоядерные реакции на Солнце или оно уже потухло?» — писать на такую тему, а лучше — делать доклады, стало модным.

Но время шло, физики, занимающиеся нейтрино, делали новые расчеты, выдвигали интересные гипотезы, группа Дэвиса продолжала свои опыты. Оказалось, что предсказания теории были сильно завышены. В то же время статистическая точность первых опытов была еще очень мала. Постепенно среднее экспериментальное значение повысилось. Сейчас ситуация выглядит не столь драматично, хотя полное согласие теории и эксперимента далеко не достигнуто.

Над созданием нейтринной службы Солнца работают и советские физики во главе с Г. Т. Зацепиным, А. Е. Чудаковым и А. А. Поманским. В 1977 г. на Северном Кавказе проходила Международная конференция по физике нейтрино — (Нейтрино-77). В один из дней ее участники

были приглашены осмотреть вступившую в строй первую очередь нейтринной обсерватории.

В глубине Баксанского ущелья в горную породу уходит туннель. Его общая протяженность должна составлять около 4 км. По ходу туннеля расположены экспериментальные залы — огромные искусственные пещеры и помещения меньших размеров — низкофоновые камеры. В 1977 г. начались измерения в первом зале, где был установлен сцинтилляционный телескоп, регистрирующий быстрые космические частицы. Детекторы солнечных нейтрино будут размещаться во втором зале, который находится в конце тоннеля и на глубине около двух километров под вершиной горы. Огромный слой вещества в миллионы раз ослабляет поток космических мезонов по сравнению с их потоком на поверхности Земли. Предполагается, что в зале будут работать одновременно несколько нейтринных детекторов разных типов и это позволит исследовать спектр солнечных нейтрино в более широких пределах, чем это сделал в своих опытах Дэвис. И, следовательно, получить больше информации о процессах, происходящих в недрах звезд.

## 2.5. Поляризованное нейтрино

Исследование слабого взаимодействия началось с поисков недостающих энергии, импульса, момента импульса в бета-распаде. И мы уже цитировали пророческие слова Нильса Бора: «Следует ожидать от бета-распада дальнейших сюрпризов».

Он, однако, вряд ли предполагал, с каким энтузиазмом слабое взаимодействие примется выполнять это предсказание. Еще раз обращаясь к прошлым страницам, напомним читателю, что законы сохранения связаны с симметрией, существующей в природе. Казалось, физики использовали уже все возможные преобразования и переносы в пространстве и повороты, но после создания квантовой механики было рассмотрено и еще одно — отражение. Будут ли физические процессы идти по-прежнему, если перенести их в зеркальный, отраженный мир? Долгое время положительный ответ не вызывал ни у кого сомнений. При отражении правая и левая стороны меняются местами и, перебирая известные явления, ученые каждый раз убеждались, что правое не отличимо от левого, как наш мир не отличается от зеркального.

Совсем простой пример: положительный заряд движется по направлению электрического поля  $E$ . Отразим его в зеркале. Поле  $E$  перейдет в  $-E$ , изменит знак и скорость заряда, и вновь окажется, что заряд движется по полю. Из неизменности поведения физических законов при отражении следовал важный для квантовой механики закон сохранения пространственной четности. А оказалось, что все не так уж очевидно. Обнаружили это в 1956 г. американские физики, китайцы по национальности, Ли Тзун-дао и Янг Чжень-нин. Они пытались объяснить одно непонятное явление, возникающее при распаде  $K$ -мезонов, и проанализировали экспериментальные данные, относящиеся к зеркальной симметрии. Оказалось, что существуют ее убедительные доказательства для сильных и электромагнитных взаимодействий, а для слабых таких доказательств нет.

Ли и Янг решились на совершенно революционное предположение — слабое взаимодействие нарушает закон сохранения четности. В нашем и зеркальном мире оно ведет себя по-разному и позволяет отличить левое от правого. Это позволило им сразу решить проблему с  $K$ -мезонами. Конечно, такая радикальная гипотеза требовала многих экспериментальных проверок. И во всех лабораториях мира стали спешно ставить опыты по исследованию симметрии слабого взаимодействия.

Уже через год появилась уверенность в правильности предположений теоретиков. Нарушение симметрии позволило Ландау, Саламу, Ли и Янгу выдвинуть почти одновременно теорию, согласно которой спин антинейтрино всегда направлен по импульсу, а нейтрино — против импульса, так, как это показано на рис. 24. Если такую частицу отразить в зеркале — она перейдет в античастицу. Ведь при отражении импульс меняет знак, а направление вращения — нет. Раньше сохранение четности это запрещало, теперь ограничение было снято. Новая теория предполагала, что слабое взаимодействие подчиняется более сложной симметрии. Для него одновременно с отражением надо заменить все

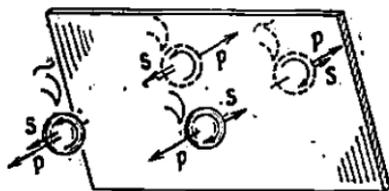


Рис. 24. При отражении в зеркале скорость меняет знак, а спин не меняет. Нейтрино переходит в антинейтрино. Нарушается пространственная четность.

частицы на античастицы, только тогда ничего в природе не изменится. И опять эксперименты подтвердили эти предсказания теоретиков. Наконец-то различие между нейтрино и антинейтрино стало более осязаемым!

## 2.6. Сохранение лептонного заряда

Легкие частицы, участвующие в слабом взаимодействии, электрон, нейтрино,  $\mu$ -мезон и их античастицы, получили название *лептонов*. Рассматривая реакции с их участием, физики пришли к выводу, что можно ввести характерную для таких частиц величину — лептонный заряд  $l$ . В таблице приведены значения  $l$  для ряда частиц.

Частица	Лептонный заряд $l$
$e^-$	+1
$e^+$	-1
$\nu$	+1
$\bar{\nu}$	-1
$\mu^-$	+1
$\mu^+$	-1
Остальные частицы	0

Рассмотрим некоторые реакции:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}, \quad (37)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}, \quad (38)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}, \quad (39)$$

$$K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu. \quad (40)$$

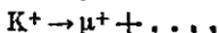
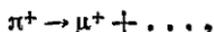
Во всех них, так же как и в процессах (29), (30), (32), (34), алгебраическая сумма зарядов  $l$  остается неизменной при превращениях частиц. Поэтому список законов сохранения пополнился еще одним — *законом сохранения лептонного заряда*. Через некоторое время он был уточнен и усложнен, о чем речь будет впереди.

## 2.7. Вопросы и задачи

34. При выделении полония и радия из урановой смоляной руды Пьер и Мария Кюри заметили, что новые элементы всегда следуют вместе с двумя уже известными. Посмотрите таблицу Менделеева и постарайтесь ответить, к каким элементам ближе по своим химическим свойствам полоний и радий?

35. Тепловая мощность солнечного излучения составляет  $W \approx 3,9 \cdot 10^{26}$  Вт. Она обеспечивается выделением энергии в термоядерных реакциях. В каждом цикле четыре протона превращаются в ядро гелия-4, вылетают два нейтрино и в виде тепла выделяется энергия  $Q \approx 20$  МэВ. Оцените поток нейтрино, падающий на  $1 \text{ см}^2$  земной поверхности (расстояние между Солнцем и Землей  $R = 149 \cdot 10^6$  км).

36. В каких из приведенных ниже реакций испускается нейтрино, в каких антинейтрино:



37. Используя данные задачи 35, найдите, какое количество водорода должно сгорать за 1 с в недрах Солнца, чтобы обеспечить такое энерговыделение с его поверхности.

## Глава 3

### СЧЕТЧИКИ, КАМЕРЫ И СЮРПРИЗЫ СЛАБОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

#### 3.1. Газовый разряд

Как часто явления, имеющие одинаковую природу, самым разительным образом отличаются друг от друга.

Матросов парусного флота приводили в суеверное опасение неожиданно появляющиеся во время грозы и шторма на мачтах и вантах огни. Они выглядели факелами или светящимися шарами и горели слегка потрескивающим голубым пламенем. По имени церкви в Италии, на шпигеле которой в непогоду часто загорался такой же факел, загадочное явление называли огнями святого Эльма. Существовало поверие, что корабль, на котором они загорелись, не погибнет в шторме.

Не меньшее удивление вызывало у путешественников северное сияние. Его загадку пытались решить многие ученые, в их числе и М. В. Ломоносов, который совершенно справедливо предполагал, что причина его «электри-

ческая сила». А зигзаги молнии в ночном небе! Как не просто далось ее исследование. И все эти явления, и еще многие, многие другие, например, мигающие лампочки на пульте вычислительной машины,— многообразные проявления электрического разряда в газах. Больше семидесяти лет назад его начали использовать в приборах, регистрирующих элементарные частицы.

Работа по изучению разряда в газах велась в Кавендишской лаборатории в течение многих лет. И здесь же, под руководством Резерфорда, был в 1908 г. сконструирован первый газовый счетчик. Он выглядел не слишком сложно: кусок металлической трубки, закрытый с обеих концов пробками из изолирующего материала. По центру трубки была протянута проволока (нить) и концы ее выведены через пробки. Воздух из счетчика откачивался до давления в  $10 \div 30$  мм. рт. ст. и между проволокой и стенками трубки прикладывалось высокое напряжение — около 1000 В. Через специальное тонкое окошко в счетчик влетали альфа-частицы (источник часто помещался и внутри), ионизовали воздух, возникал газовый разряд, и импульс тока, проходящий через счетчик, мог быть зарегистрирован. Резерфорд и Гейгер использовали этот прибор в своих опытах и он позволял надежно регистрировать сотни импульсов в секунду. Никакого сравнения со счетом сцинтилляций и многочасовым сидением в темной комнате. Газоразрядный детектор быстро завоевывал популярность, в течение ряда лет он усовершенствовался, менялась конфигурация электродов, искались наиболее приемлемые режимы работы, газы для наполнения счетчиков и т. д., и т. п. К настоящему времени создано множество видов таких детекторов. Они успешно конкурируют с другими счетчиками элементарных частиц и очень широко используются в ядерной физике, химии, геологии, медицине и в технике.

### 3.2. Типы газоразрядных счетчиков

В разных по своему назначению счетчиках используют различные типы газового разряда, и нам следует, хотя бы и очень кратко, но все же познакомиться с физикой этого явления. На рис. 25 изображен в двух проекциях (сбоку и с торца) газовый счетчик. Между его нитью, которая служит положительным электродом-анодом, и стенками трубки (катод) батарея создает разность

потенциалов  $u$ . Поле внутри счетчика выглядит так, как это показано справа на рис. 25. Оно неоднородное и у анода его напряженность больше, чем у катода. Этому соответствует большая густота силовых линий у нити. Рассмотрим теперь работу такого детектора частиц, когда

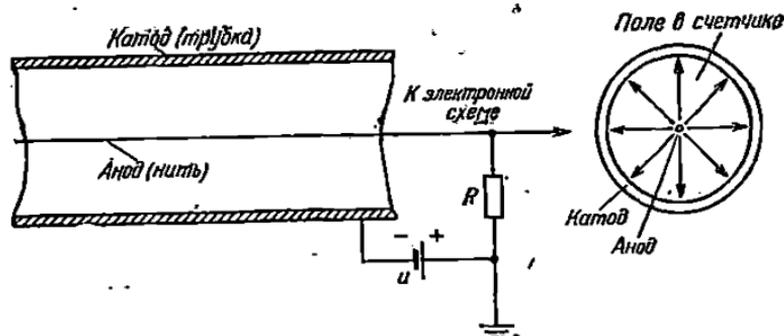


Рис. 25. Схема газоразрядного счетчика и электрического поля в нем.

величина  $u$  постепенно увеличивается. Вот заряженная частица попадает в газ, когда напряжение  $u$  равно нулю. Тогда образовавшиеся пары ионов и электронов через небольшой промежуток времени нейтрализуются — рекомбинируют и импульса тока на сопротивлении  $R$  не возникает. Увеличивая  $u$  (рис. 26), мы заставим ионы двигаться

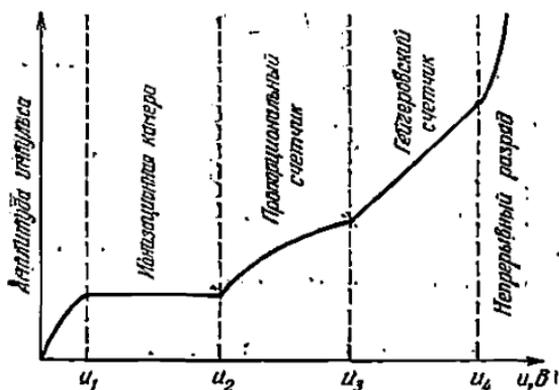


Рис. 26. Различные виды газового разряда.

по полю — к катоду, а электроны против поля — к аноду. Скорость, с которой они направленно движутся к электроду, называется скоростью дрейфа. Поскольку ионы в ты-

сячи раз тяжелее, то и их скорость дрейфа во много раз меньше. Приложенное напряжение не даст всем парам рекомбинировать и по сопротивлению  $R$  пойдет ток, увеличивающийся с ростом  $u$  от нуля до  $u_1$ . На участке, где напряжение меняется от  $u_1$  до  $u_2$ , все образовавшиеся в следе частицы ионы достигают электродов и полный заряд, проходящий по сопротивлению  $R$ , составляет  $Q = eN$ , где  $N$  — число пар ионов. Ток уже не зависит от напряжения (так называемый ток насыщения). Газовый детектор, работающий в таком режиме, носит название *ионизационная камера*.

Самая простая из известных ионизационных камер — электроскоп. Когда он подвергается облучению, то воздух внутри электроскопа ионизируется и становится проводником. Листочки опадают. В предыдущей главе уже описывалось, что таким прибором супруги Кюри определяли интенсивность излучения препаратов радия. Электрометр использовали в геологии при поисках радиоактивных руд, пока более совершенные детекторы не вытеснили его.

Часто используются ионизационные камеры с плоскими параллельными электродами, такими, чтобы электрическое поле было однородно. С их помощью удобно регистрировать энергию частиц, длина пробега которых полностью уместится внутри чувствительного объема — например, осколков деления тяжелых ядер (пробег 2,5 см в воздухе при нормальном давлении). Некоторые трудности представляет то, что импульс тока от ионизационной камеры весьма мал. Если, скажем, пробег  $\alpha$ -частицы с энергией 3,5 МэВ уложился внутри камеры, то там возникает  $10^5$  пар ионов с суммарным зарядом всего лишь  $10^{-14}$  Кл. (см. с. 42). Для регистрации такого количества электричества надо применять специальные электронные усилители. В первые годы, когда создавались ионизационные детекторы, таких приборов еще не было и физики использовали более высокое напряжение для питания счетчиков и, следовательно, другие режимы газового разряда.

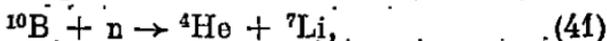
Поэтому перейдем к описанию процессов, возникающих в газе при изменении напряжения на счетчике в пределах от  $u_2$  до  $u_3$  (см. рис. 26).

Эта область носит название пропорциональной, а детекторы, работающие в таком режиме, — *пропорциональные счетчики*. Теперь поле вблизи от нити оказывается достаточным для того, чтобы электроны между двумя соударениями успели разогнаться до энергии  $E$ , равной или

большей потенциала ионизации. С определенной вероятностью налетающий электрон ионизирует атом, выбивает вторичный электрон, последний разгоняется и т. д. Процесс нарастает лавинообразно, пока электроны не соберутся на нити. Полный заряд, прошедший через сопротивление,  $Q = KeN$ , где  $K$  — коэффициент газового усиления. Он может изменяться от единиц до десятков тысяч, в зависимости от режима работы. Важно, что  $Q$  все еще пропорционально  $E$  и несет информацию об энергии, оставленной частицей в детекторе \*).

Первый счетчик Резерфорда и Гейгера работал в пропорциональном режиме. Он регистрировал только альфа-излучение, поскольку ионизационная способность  $\beta$ -частиц значительно меньше, а электронные усилители, как мы уже говорили, появились много позже.

Пропорциональные счетчики широко применяются в настоящее время для регистрации мягкого рентгеновского и  $\beta$ -излучений. Специальные их типы, наполненные газами  $BF_3$  или гелием-3, используются для регистрации медленных нейтронов. Нейтроны захватываются ядрами бора-10:



или гелия-3:



В первом случае альфа-частицы и ядро лития уносят энергию 2,7 МэВ, во втором продукты реакции имеют суммарную энергию  $\approx 0,8$  МэВ. Так как пробеги образовавшихся заряженных частиц очень малы и, в большинстве случаев, полностью укладываются внутри чувствительного объема счетчика — энергетический спектр событий от захвата нейтронов имеет вид узкого пика. Это позволяет легко отличать нейтронные события от всяких других и регистрировать эти частицы борными и гелиевыми детекторами в условиях значительного гамма-фона.

Пропустим теперь область напряжений, носящую название области ограниченной пропорциональности, и обратимся к величинам  $u > u_3$ . В таком режиме амплитуда импульса уже не зависит от первоначального числа ионов. Вызвано это следующими причинами. При увеличении

\*) При соударении с электронами происходит еще и процесс возбуждения молекул газа. Испущенные фотоны могут выбить из катода электроны, а те вызвать повторный импульс в счетчике. Однако при  $K < 1000$  вероятность возникновения таких вторичных процессов мала и они почти не искажают импульсов.

напряжения на счетчике значительно увеличивается и число фотонов, попадающих на катод и выбивающих из него фотоэлектроны. Те, двигаясь к аноду-нити, снова вызывают лавину, снова излучаются фотоны и т. д. Если в пропорциональном счетчике вторичные процессы носили затухающий характер, то теперь разряд поддерживает себя сам и носит название *самостоятельного*. Счетчик «забывает» о первичной ионизации. Возникает законный вопрос: каким образом этот разряд прекращается и детектор снова может быть готов к работе? Оказывается, все дело в малой скорости перемещения положительных ионов. Пока нарастают электронно-фотонные лавины, они не успевают уйти далеко от нити счетчика и с развитием разряда образуют вокруг нее положительно заряженный «чехол». Напряженность поля вокруг нити падает, разряд угасает. Однако он может вспыхнуть вновь, когда положительные ионы дойдут до стенок счетчика (катода) и будет происходить их нейтрализация. Опять возникнут фотоны, способные дать лавину. Вторичный разряд предотвращают либо специальными электронными гасящими схемами, либо с помощью введения в счетчик, кроме основного газа (например, аргона), еще многоатомного газа (паров спирта, метана и т. п.). Роль последнего сводится к поглощению фотонов и к нейтрализации при соударении ионов основного газа. Мы не будем останавливаться на этих процессах, отметим только, что такие «самогасящиеся» счетчики нашли наиболее широкое применение.

В 1913 г. Гейгер впервые использовал счетчик с самостоятельным разрядом, а в 1928 г. в работе Гейгера и Мюллера он подвергся существенным усовершенствованиям. Поэтому детекторы, работающие в этой области газового разряда, часто называют *счетчиками Гейгера—Мюллера*. Добавлять к основному газу счетчика пары спирта предложил в 1937 г. Трост. Самостоятельный газовый разряд в счетчике Гейгера—Мюллера — это коронный разряд. Именно его появление в виде пляшущих огненных язычков или светящихся гирлянд на мокрых корабельных канатах приписывалось в средние века влиянию святого Эльма.

### 3.3. Счетчик для солнечных нейтрино

Газовые счетчики использовались и сейчас используются в нейтринных экспериментах. С их помощью проводились опыты по отдаче ядер и были получены кос.

венные доказательства существования нейтрино, измерилась масса  $\nu$ ; наконец, уже в последнее время пропорциональные счетчики, наполненные гелием-3, помогли обнаружить нейтральные токи, о чем мы будем говорить в конце этой книги.

А сейчас, выполняя обещание, вернемся к экспериментам с солнечным нейтрино. Итак, радиоактивные атомы аргона-37 вместе с газом-носителем поступали в счетчик. Как их зарегистрировать? При распаде аргона-37 в хлор-37 происходят достаточно сложные процессы, но нам важно, что в результате их вылетает электрон с очень небольшой энергией (2,8 кэВ). Пробег такого электрона в газе при нормальном давлении составляет десятки доли миллиметра. Соответственно, размеры счетчика могут быть сделаны малыми, а чем меньше счетчик, тем меньше его собственный фон и тем легче защитить его от радиоактивности окружающей среды. Маленький фон и высокая эффективность регистрации — необходимые условия для использования детектора в таком эксперименте, поскольку во всей установке один атом аргона возникал в среднем один раз в трое суток.

Опишем теперь одну из применявшихся конструкций такого счетчика (детектор постоянно совершенствуется). Объем его составлял менее 1 см<sup>3</sup>. Катод был изготовлен из сверхчистого железа, выплавленного по особой технологии, чтобы по возможности снизить содержание элементов с естественной радиоактивностью. Внешняя оболочка счетчика — тоже сверхчистый материал — плавленный кварц. Он окружался слоем пассивной защиты, в ряде экспериментов — сталью, а также ртутью. Вся эта установка находилась внутри очень большого кристалла иодистого натрия, который служил активной защитой. Наконец, использовался и второй слой активной защиты — кольцо пропорциональных газовых счетчиков, окружающих кристалл.

Невольно на память приходит восклицание одного из иностранных гостей конференции «Нейтрино-77». Он с удовольствием рассматривал купленную матрешку, состоящую из многих, входящих друг в друга фигурок, разбирая и собирая ее и, наконец, радостно произнес: «Я догадался, что это такое. Это простая деревянная модель детектора Дэвиса!»

События, связанные с распадом аргона-37, отбирались по двум признакам — по амплитуде импульсов и по их

форме. Первое достаточно понятно. Счетчик пропорциональный, поэтому на энергетическом спектре импульсы от электронов с энергией 2,8 кэВ должны выглядеть в виде одиочного пика.

А фон распределен по всему энергетическому диапазону более или менее равномерно. Что касается исследования формы импульса, то оно дало очень интересные результаты. Пусть быстрая фоновая частица, пролетая через счетчик, оставит там ту же энергию, что и электроны распада аргона-37. Ее трек может представлять редкую цепочку из ионов, тогда как электрон все эти ионы образует почти в точке. Двигаясь в электрическом поле счетчика к нити и рождая в ее окрестности лавины, заряды от быстрой частицы создадут более протяженный по времени импульс, хотя полное количество электричества в обоих случаях будет одинаково. Таким образом, импульсы будут различными по форме нарастания во времени. Если исследовать их с помощью специальной аппаратуры, то можно разделить эффект и фон.

Благодаря всем принятым мерам и многолетней работе по усовершенствованию детектора фон счетчика в экспериментах группы Дэвиса стал 0,5 отсчетов за 35 суток измерения! А ведь в первых экспериментах по изучению различия между  $\nu$  и  $\bar{\nu}$ , поставленных в 1955—1956 гг., он составлял 30—60 штук в день.

### 3.4. Искровая камера

Пришло время перейти от описания одного из самых малых ионизационных детекторов к описанию одного из самых больших. Он использовался в нейтринных экспериментах на ускорителях и размеры такого детектора под стать этим огромным машинам, с помощью которых физики все глубже проникают в недра вещества. Речь идет о больших искровых камерах. А искровой разряд, конечно, видел каждый из нас.

Молния ударила в высокое дерево. Представим себе, что время замедлилось и мы можем увидеть последовательную картину развития этой гигантской искры. Под действием огромной разности потенциалов потоки электронов двинулись от облака к поверхности Земли. За счет ионизации ударом, излучения фотонов возбужденными атомами и фотоионизации воздуха возникли лавины зарядов. Они слабо светятся и пробивают свой путь как бы от-

дельными рывками, следующими друг за другом через каждые  $10^{-5} \div 10^{-4}$  с. Их траектория — причудливая ломаная линия. Наконец, лавины-разведчики соединили облако и Землю проводящим шнуром — стримером, состоящим из плазмы — электронов и ионов. По этому каналу устремляется мощный поток зарядов. Молния! Длина стримера может достигать до 10 км, а диаметр — составлять десятки сантиметров. Каждый удар молнии состоит из нескольких вспышек разряда, который следует по пути, проложенному лавинами-разведчиками. Полное число вспышек может достигать пятидесяти.

Газ в канале стримера разогревается до высокой температуры, расширяется, и звук от ударной волны мы называем раскатами грома. Это могучее явление природы полностью аналогично искре, проскакивающей между плоскими пластинами камеры по пути пролетевшей частицы.

Только высокое напряжение между стенками (электродами) камеры существует недолго. Оно подается специальной электронной схемой на короткий промежуток времени после прохождения заряженной частицы. При этом используется то, что камера обладает некоторой «памятью». Электроны и ионы, из которых состоит трек уходят и рекомбинируют не сразу. После подачи напряжения на следе частицы начинают развиваться лавины, они переходят в стример и между пластинами проскакивает искра. Путь искры повторяет траекторию частицы, если последняя составляла не очень большой угол с направлением поля в камере. После того как импульс высокого напряжения кончился, кончается и разряд. Как получает электроника сигнал о том, что пора подавать на пластины высокое напряжение? Для этого впереди камеры (иногда сзади) по направлению полета частиц помещаются гейгеровские или сцинтилляционные счетчики. Они регистрируют частицу и сигнал об этом запускает систему высоковольтного питания искровой камеры. Обычно камера устроена таким образом, что электроды помещены в сосуд с газом, имеющий прозрачную стенку. Тогда искры, возникающие при прохождении частицы, можно сфотографировать и, используя несколько разрядных промежутков, наблюдать ее след (рис. 27). Итак, искровая камера относится к такому типу детекторов, который дает возможность наблюдать за траекторией частицы. Они носят название *трековых*.

В ряде экспериментов камера помещалась в магнитное поле, оно искривляло след частицы и по фотографиям можно было определить ее импульс. В самых первых

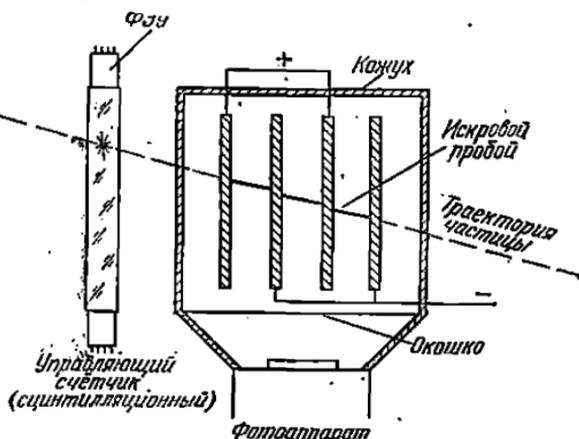


Рис. 27. Принципиальная схема искровой камеры.

нейтринных экспериментах, поставленных на ускорителе, физики воспользовались искровой камерой и она помогла им открыть еще один «сюрприз», связанный с  $\nu$ . Прежде чем рассказывать об этих экспериментах, введем читателя в круг обсуждавшихся проблем.

### 3.5. Гипотеза о двух типах нейтрино

Прошло уже много лет с 1937 г., когда в составе космического излучения физики открыли вторую элементарную частицу —  $\mu$ -мезон (первая — позитрон, как вы помните, была открыта в космических лучах пятью годами раньше). Ее обнаружение не было для экспериментаторов столь же неожиданным, как появление повитрона. Они давно подозревали, что жесткая компонента космического излучения состоит из какого-то неизвестного сорта однократно заряженных частиц. И доказали это. Потом, в продолжение приблизительно десяти лет,  $\mu$ -мезон занимал не свое место среди элементарных частиц — считали, что это и есть предсказанная Юкавой частица, переносящая ядерное взаимодействие. Наконец, в 1947 г. открыли  $\pi$ -мезон, который и оказался кванто этих сил. А  $\mu$ -мезон остался просто тяжелым аналогом электрона ( $m_{\mu} \approx 205 m_e$ ), сотворенным природой с пока еще не понятными целями. Ученые внимательно исследо

вали реакцию его распада, при котором возникают  $\beta$ -частицы, нейтрино и антинейтрино. Например, для положительного мюона:

$$\begin{aligned} \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}, \\ (-1) &\rightarrow (-1) + (+1) + (-1). \end{aligned}$$

Внизу под символами частиц, участвующих в реакции, приведены величины их лептонных зарядов. До и после распада сумма чисел одинакова в соответствии с законом сохранения лептонного заряда. Казалось бы, распад на позитрон и два нейтрино — не единственная возможность для  $\mu$ -мезона. Рассматривались и такие процессы:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma, \quad (43)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + e^+ + e^-. \quad (44)$$

В них не нарушаются никакие законы сохранения и они отличаются от реакции, приведенной выше, только тем, что нейтрино и антинейтрино успели аннигилировать (43) или родить электрон-позитронную пару  $e^+e^-$  (44). Теоретики оценили вероятность  $W$  процессов (43) и (44). Оказалось, что, например,

$$K = \frac{W(\mu \rightarrow e + \gamma)}{W(\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu})} = 10^{-3} \div 10^{-4}.$$

Начались поиски таких процессов. Искали, но не находили. Ограничения на величину  $K$  все уменьшались: меньше  $10^{-4}$ , меньше  $10^{-5}$ ,  $10^{-7}$  \*) и т. д. Природа упорно запрещала мюону распадаться на электрон и гамма-квант.

И для того чтобы объяснить этот запрет, физики предположили, что существует два типа нейтрино. Одно сопутствует электрону ( $\nu_e$ ) и второе — мюону ( $\nu_\mu$ ). В распаде нейтрона и  $\pi^-$ -мезона возникают разные антинейтрино:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (45)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \quad (46)$$

а реакцию распада  $\mu$ -мезона следует написать в виде

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e. \quad (47)$$

В этом случае вместо одного лептонного заряда можно ввести два: электронный —  $l_e$  и мюонный —  $l_\mu$ , и два закона сохранения:  $\sum l_e = \text{const}$  и  $\sum l_\mu = \text{const}$ . Значения

\*) По последним данным (1979 г.)  $K < 1,9 \cdot 10^{-10}$ .

Частица	$l_e$	$l_\mu$
$e^-$	1	0
$e^+$	-1	0
$\nu_e$	1	0
$\bar{\nu}_e$	-1	0
$\mu^-$	0	1
$\mu^+$	0	-1
$\nu_\mu$	0	1
$\bar{\nu}_\mu$	0	-1
Остальные частицы	0	0

этих зарядов для различных лептонов приводятся в таблице.

Теперь процессы распада мюона на позитрон и гамма-квант (43) или на электрон и два позитрона (44) окажутся автоматически запрещенными новыми законами сохранения.

Гипотеза могла превратиться в твердо установленный факт только после ее подтверждения экспериментом.

Опыт по изучению различия  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$  был первым из нейтринных экспериментов, выполненных на ускорителях высоких энергий. Его идея (она принадлежала В. Поптекорво) предполагала возможность наблюдения взаимодействия  $\nu_\mu$  с веществом (аналогично опыту Рейнеса — Коуэна для  $\bar{\nu}_e$ ). Если при таком взаимодействии будут рождаться мюоны и не будут возникать электроны, то это послужит доказательством того, что  $\nu_\mu \neq \nu_e$ .

### 3.6. Нейтринные эксперименты на ускорителях

Как часто теперь можно услышать слова: ускорение частиц, ускоритель, гигантский ускоритель. А ведь появились они даже в лексиконе физиков сравнительно недавно. И снова история возвращает нас к 1932 г., золотому году экспериментов. Именно в этом году два молодых физика Джон Кокрофт и Эрнст Уолтон, работавших в лаборатории Резерфорда, расщепили ядро лития-7 протонами, ускоренными до энергий 600—700 кэВ. Собственно сама идея, заключающаяся в том, что в элект-

рическом поле можно разогнать до высоких энергий заряженные частицы, обсуждалась и была воплощена в жизнь в нескольких лабораториях.

За десять лет до этого, в еще не оправившемся от голода и разрухи Петрограде, был создан Радиевый институт. Руководитель его физического отдела Л. Мысовский вместе со студентом В. Рукавишниковым предложили разогнать альфа-частицы до нескольких миллионов электронвольт с помощью генераторов высокого напряжения. Через семь лет на другом конце земли в Принстонском университете США Ван де Грааф создал новый, очень интересный тип электростатического генератора. Он позволял получать постоянную разность потенциалов сначала в сотни тысяч, а в более поздних моделях и в миллионы вольт. Эта разность потенциалов, приложенная к вакуумной трубке, могла разгонять ионы водорода — протоны или ионы других газов. И всё же именно Кокрофт и Уолтон с помощью ускорителя впервые совершили открытие в ядерной физике. Протоны влетали в ядро лития-7, преодолев его кулоновское отталкивание (вот зачем их надо было разогнать), и разрывали его, расщепляли. В результате реакции получались две альфа-частицы. Хотя при создании своего прибора английские исследователи старались быть очень экономными и широко использовали жестяные банки из-под печенья и другие «находки», тем не менее машина вышла отнюдь не дешевой и огромной, как полагали ее создатели (она стоила 1000 фунтов стерлингов и занимала довольно большую комнату).

В том же 1932 г. молодой адъюнкт-профессор Калифорнийского университета Э. Лоуренс получил пучок протонов, ускоренных почти до четырех миллионов электронвольт. Пучок вылетал из сконструированного им первого кольцевого ускорителя-циклотрона. В ускорителе частицы разгонялись электрическим полем, а магнитное заворачивало их траекторию. Таким образом, пучок мог многократно проходить ускоряющий промежуток. Он двигался по плоской спирали, набирая энергию и увеличивая радиус, пока не вылетал за пределы магнитного поля. В первых моделях размеры ускоряющих камер составляли 10, 12,5 см. Ускоритель монтировался с применением стеклянных трубочек, пластинок, сургуча и т. п. Потом одна кампания подарила исследователю ржавяющий на складах 74-тонный магнит. Это и позволило ускорить протоны до 4 МэВ.

Итак, новорожденный прибор появился на свет. И после этого зашагал семимильными шагами.

Через каждые пять лет энергии ускоряемых частиц возрастали приблизительно в 10 раз. Рождались оригинальные идеи и вслед за этим создавались новые типы ускорителей. Комнаты сменились залами, затем ангарами. Пришло время, когда сфотографировать ускоритель целиком стало возможным только с самолета. Цифры в 1000 фунтов дополнились справа таким количеством нулей, что строительство ускорителей стало по карману только наиболее богатым странам. Но и они объединяются для создания новых гигантов.

И на самых современных машинах создаются нейтринные пучки и ставятся нейтринные эксперименты: на ускорителе Института физики высоких энергий — ИФВЭ (недалеко от г. Серпухова, СССР), на синхротроне Европейского центра ядерных исследований (Швейцария), на ускорителе Национальной лаборатории им. Ферми (США). Однако эти гиганты, на которых протоны разгоняются до энергии в сотни миллиардов электрон-вольт, появились на сцене позже, чем были выполнены первые нейтринные эксперименты. А тогда, в 1962 г., опыты, поставленные на Брукхейвском ускорителе (США), казались ошеломляющими.

Пучок протонов, разогнанных в ускорителе, в определенный момент отклоняется мощным импульсом магнитного поля. Он выходит из камеры ускорителя и попадает в мишень, обычно сделанную из бериллия. При взаимодействии протонов с веществом рождаются быстрые  $\pi$ - и  $K$ -мезоны. Вылетая из мишени и распадаясь на лету в специальном пролетном туннеле (например, в ускорителе ИФВЭ — это вакуумная труба длиной около 140 м), мезоны излучают нейтрино высокой энергии:  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ,  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ ,  $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  и  $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ . Дальше пучок частиц попадает в пассивную защиту. В Брукхейвене для этой цели была использована броня, снятая со старого военного корабля. Толщина защиты составляла тринадцать метров. Благодаря ей поток сильно взаимодействующих частиц ( $\pi$ ,  $K$ ,  $p$  и т. п.) снижался на двадцать четыре порядка.

Остановившиеся в защите мезоны тоже излучают при распаде нейтрино. Среди них и электронные (например, при распадах  $\mu$ -мезонов). Но они обладают существенно меньшей энергией, чем родившиеся на лету, и не играют

роли для проводившегося эксперимента. Если существуют два сорта нейтрино — мюонное и электронное, то ускоритель — практически чистый источник  $\nu_\mu$  и  $\bar{\nu}_\mu$ .

Теперь следует сказать, что эксперименты на ускорителе сильно отличаются от реакторных опытов. Хотя общий поток нейтрино в первом случае на много порядков меньше, сами частицы обладают в тысячи раз большей энергией. А это очень важно, так как резко увеличивается вероятность взаимодействия нейтрино с веществом, открывается возможность исследовать реакции с высоким энергетическим порогом. Например, рождение мюона невозможно при взаимодействии с веществом реакторных нейтрино — их наибольшая энергия в двадцать раз меньше массы покоя  $\mu$ -мезона, а для нейтрино от ускорителя соотношение обратное. Наконец, высокая энергия частиц позволяет успешно бороться с фоном. Фон естественной радиоактивности остается далеко внизу по энергетической шкале. Быстрые космические частицы летят в основном вертикально, а продукты нейтринных реакций — пучком по направлению полета  $\nu_\mu$ . И тем не менее, перечисленные преимущества никоим образом не превратили нейтринные эксперименты в тривиальную задачу. Они потребовали создания уникальных детекторов, способных вместить огромную массу вещества, отличить нейтринное событие от фона и родившийся  $\mu$ -мезон от электрона.

Для того чтобы зарегистрировать нейтрино, понадобилась огромная искровая камера, содержащая больше десяти тонн вещества. Она состояла из десяти одинаковых секций и была окружена сверху и с боков детекторами активной защиты для уменьшения космического фона, каждая секция начиналась и кончалась запускающими счетчиками. Между ними стояли параллельно десять алюминиевых пластин площадью  $1,5 \text{ м}^2$  каждая. Пластины служили электродами и разделялись разрядными промежутками. Нейтрино могло рождать легкую заряженную частицу — электрон или мюон в веществе пластин — и та, обладая большой энергией, проходила через несколько разрядных промежутков. Чтобы уменьшить фон, считались только такие события, трек которых возникал внутри секции, т. е. событие было вызвано нейтральной частицей. Кроме того, отбирались частицы, летящие под углом, меньшим шестидесяти градусов к направлению нейтринного пучка.

Мюоны можно было отличить от электронов по характерным линиям вторичных частиц, которые возникали в камере. Было зарегистрировано 34 мезонных события, отвечающих всем критериям отбора. Пять из них могли возникнуть за счет космического фона. Если бы  $\nu_e \equiv \nu_\mu$ , число событий, вызванных электронами, тоже должно было бы быть около тридцати. Но их не наблюдали. Это дало возможность авторам сделать вывод о существовании двух типов нейтрино. В Брукхейвенском опыте статистика была невелика. Поэтому он через год был повторен в Центре Европейских ядерных исследований, где тоже использовалась многотонная искровая камера. Эксперименты подтвердили результаты Брукхейвена уже на тысячах зарегистрированных событий.

### 3.7. Вопросы и задачи

38. Ион, движущийся в ионизационной камере под действием приложенного поля  $E = 500$  В/см, испытывает в секунду  $n = 10^{10}$  соударений с молекулами газа (азота). Найти скорость дрейфа этого иона  $v$ , т. е. скорость его направленного движения к электроду, если заряд иона  $e$ , масса  $M$ . (Можно считать, что при каждом соударении ион теряет всю полученную от движения в поле энергию.)

39. В плоской ионизационной камере (ее электроды — параллельно расположенные пластины) снимали зависимость амплитуды

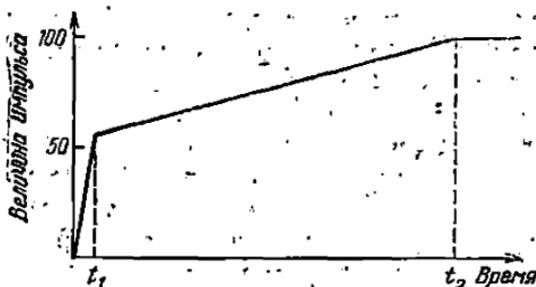


Рис. 28. Нарастание импульса со временем.

импульса от времени, график которой представлен на рис. 28. Почему в точке  $t_1$  характер нарастания импульса меняется? Что происходит при  $t > t_2$ ?

40. В каком случае счетчик, используемый в экспериментах Дэвиса, не позволит по форме нарастания импульса разделить частицы, оставившие в нем одинаковую энергию, но имеющие разные формы треков? Например, электрон от распада аргона-37 ( $E = 2,8$  кэВ) и гамма-квант, давший в разных точках два комптоновских электрона с  $E = 1,4$  кэВ каждый.

41. Диаметр основного кольца Серпуховского ускорителя (ИФВЭ) равен 470 м. За каждый из оборотов энергия ускоряемых

протонов, возрастает на 190 кэВ. Какой путь должны проделать частицы для того, чтобы достичь энергии в  $70 \cdot 10^9$  МэВ? Сколько оборотов сделать? Во сколько раз при этом возрастет их масса \*)?

42) Один из пучков ускорителя ИФВЭ состоит из отрицательных  $\pi^-$ - и  $K^-$ -мезонов. Их средняя энергия около  $40 \cdot 10^9$  МэВ. На сколько процентов скорость таких частиц меньше скорости света \*)?

## Глава 4

### ДВОЙНОЙ БЕТА-РАСПАД.

### ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СЧЕТЧИКИ

#### 4.1. Специализация

В XX веке физики окончательно разделились на теоретиков и экспериментаторов. И это деление продвигается все дальше и дальше. Растет число различных направлений в экспериментальной и теоретической физике. И вот уже специалистам по космическим лучам и твердому телу становится нелегко понимать друг друга. Причина всем известна и состоит в колоссальном объеме знаний, который уже накоплен и который продолжает расти, словно снежный ком, катящийся под горку. Все чаще можно услышать и прочитать о том, что в наши дни уже не появится в теории новый Ландау и, тем более, физик, подобный Ферми. Один из известных американских физиков писал по этому поводу: «Прошли времена Фарадея с его Андерсоном\*\*), Резерфорда с его Кеем\*\*\*). Настало время коллективных усилий. Оплакивать это — значит оплакивать второй закон термодинамики. Но это не означает, что не может быть индивидуально ярких ученых. Изменился характер, но не значимость подготовки в университетах таких ученых-физиков...»

Итак, молодому человеку, вступающему в науку, приходится выбирать. Существует множество личных (и не личных) причин, из-за которых он становится теоретиком или экспериментатором. Конечно, никому не закрыта возможность переменить специальность, но это бывает достаточно редко. По моим наблюдениям чаще теоретики переходили в экспериментаторы, чем наоборот. Но здесь могла сказаться и пристрастность автора. Существует

\*) Энергии покоя частиц см. в таблице в конце книги.

\*\*) Ассистент М. Фарадея.

\*\*\*) Ассистент Э. Резерфорда. По словам последнего — «лучший лабораторный ассистент в Британской империи».

ведь в физическом фольклоре легенда об ученом (теоретике мирового класса, одном из любимых учеников Ландау), который очень решительно оборвал свою экспериментальную карьеру.

Рассказывают, что он был дипломником и налаживал свою первую установку, внутри которой должен был поддерживаться вакуум. Дело никак не ладилось, в установку попадал воздух, как говорят, она «текла», то в одном месте, то в другом. Его товарищи привыкли уже к непрерывному стуку вакуумного насоса и, уходя с работы, видели свет, горевший в лаборатории до глубокой ночи. Проходили недели, а положение существенно не изменялось.

Так это продолжалось, пока однажды из лаборатории не донесся звон и грохот. Сбежавшиеся люди застали молодого физика сидящим на полу, посреди осколков стекла и железок. Он успокоенно улыбался и держал в руке молоток. На вопросы будущий академик ответил, что твердо решил заняться теорией.

Приходит третий курс института и будущие физики начинают специализироваться по разным профилям. Созданы отдельные кафедры для тех, кто будет ставить опыты, и для тех, кто будет создавать детекторы. Это понятно. Все уже привыкли, что современные физические эксперименты невозможны без сложнейших приборов. Часто эти приборы и огромны по размерам (вспомним хотя бы трековые камеры на ускорителях), и их создание и работа на них требует привлечения не только физиков, но и инженеров, техников, ученых других специальностей. Природа выдает свои тайны под натиском коллективных усилий. Очень показателен такой пример. Статью с описанием нейтринного эксперимента в Брукхейвене, о котором шла речь в предыдущей главе, подписали семь авторов. Ведущие физики среди них — Ледерман и Шварц. Прошло несколько лет и такое небольшое число авторов работы, посвященной нейтринным экспериментам на ускорителе, стало редкостью. Привычен уже список фамилий, занимающий четверть печатной страницы. В открытии нейтральных токов в слабом взаимодействии (об этих токах речь пойдет ниже) участвовали: в одной работе — 55, в другой — 51 соавтор.

Итак, растущая специализация связана и с увеличением коллективов, которым под силу решать сложные экспериментальные задачи. Конечно, остались и очень инте-

ресные проблемы, требующие не массовости, а, скорее, изощренности и изобретательности. Одна из них мучает физиков очень давно — она возникла незадолго до появления на сцене нейтрино. Эксперименты, которые физики ставили, чтобы разрешить эту задачу, отличались применением самых разнообразных детекторов и неожиданных методов. Поскольку они не требовали сногшибательных расходов, то привлекали исследователей из самых разных стран. А результаты... Но не стоит забегать вперед.

#### 4.2. Когда из ядра вылетают два электрона

Предсказание этого процесса связано с именем Марии Гепсерт-Майер, теоретика, много сделавшего в ядерной физике. Примерно через год после создания Э. Ферми теории бета-распада она опубликовала работу, в которой обсуждала его возможность.

Обратимся к рис. 29, на котором представлены основные энергетические состояния трех ядер (изобар) с последовательно уменьшающимся числом нейтронов и возрастающим числом протонов:  $(Z, N)$ ;  $(Z + 1, N - 1)$  и  $(Z + 2, N - 2)$ . Бета-распад первого ядра во второе запрещен законом сохранения энергии — основное состояние последнего лежит выше по энергетической шкале. А вот  $\beta$ -распад первого в третье этим законом не запрещен.

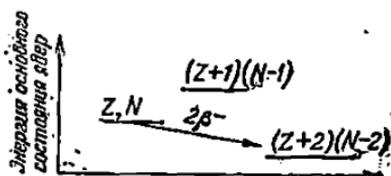
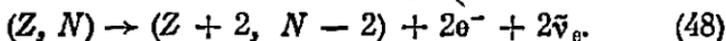


Рис. 29. Энергетические уровни трех ядер.

Он может выглядеть следующим образом:

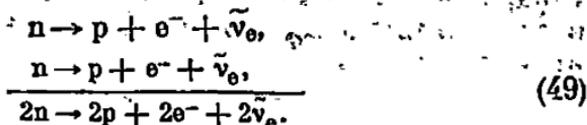


Два нейтрона ядра одновременно превращаются в протоны и при этом вылетают лептоны. Процесс этот носит название *двойного бета-распада*.

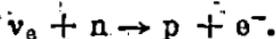
Внимание физиков он привлек потому, что мог служить для проверки закона сохранения лептонного заряда. Проследим ход их рассуждений. Реакция (48), в принципе, может иметь два внутренних механизма \*).

\* ) Б. Поптекорво предложил и третий, очень интересный механизм, но его мы касаться не будем.

Первый — это независимое превращение нейтронов в протоны:



Теперь на время предположим, что не существует закона сохранения лептонного заряда. Тогда становится возможным второй механизм для двойного бета-распада. При превращении первого нейтрона вылетает не антинейтрино, а нейтрино. И оно как катализатор вызывает распад второго нейтрона:



Эта реакция идет лишь при виртуальном участии  $\nu_e$ . Вместо четырех лептонов вылетают два — только электроны:



Конечно, опыт Дэвиса по изучению обратного бета-распада Ag-37 уже убедил физиков, что сильного нарушения закона сохранения лептонного заряда ожидать нельзя. Ну, а частичного? Если удастся зарегистрировать процесс (50), это будет иметь очень важные следствия, ведь последнее время, в связи с проблемой «Великого объединения» взаимодействий (слабого, электромагнитного, ядерного) обсуждается вопрос о весьма ничтожном, но все же нарушении сохранения барионного и лептонного зарядов. (Мы уже касались этого, когда говорили о возможной нестабильности протона.)

Сопоставляя между собой реакции (48) и (50), можно увидеть, как отличить двухнейтринный распад от безнейтринного. В последнем случае суммарная энергия электронов будет всегда постоянной — она определяется только разностью энергий основных состояний ядер  $(Z, N)$  и  $(Z + 2, N - 2)$ . А в первом случае электроны обладают непрерывным спектром энергий, так как излучаются еще и два антинейтрино.

И еще: безнейтринный распад должен происходить намного быстрее. Приблизительно в миллион раз, если бы  $\nu_e \equiv \bar{\nu}_e$ . А если закон сохранения лептонного заряда нарушается в 1% случаев — то в десять тысяч раз быстрее, и т. п. Поэтому экспериментатор, доказавший су-

ществование безнейтринного распада, мог получить оценку точности этого закона — это отношение времени жизни ядра, предсказываемого теорией при полной тождественности нейтрино и антинейтрино, к экспериментальному времени жизни:

$$\tau_{\text{теор}} (\nu_e \equiv \bar{\nu}_e) / \tau_{\text{эксп}}$$

Если изучить таблицу всех изотопов, то можно найти около сотни ядер, которые могли бы испытывать двойной бета-распад. Но по многим причинам большинство из них не подходит экспериментаторам. После отбора они оставили меньше десяти изотопов.

Первые опыты были поставлены давно. С тех пор группы физиков во всем мире не раз возвращались к поискам этого процесса. Граница точности все отодвигалась, и теперь она лежит в области времен  $\tau_{\text{эксп}}$  больших  $10^{21}$  лет. А это значит, что в одном грамме исходного вещества может происходить один распад в год. И такие активности надо уметь обнаружить.

Естественно напрашиваются три возможных пути: либо сидеть и ожидать многие годы, либо увеличить массу вещества, либо делать и то, и другое. И при этом суметь подавить фоновые процессы.

### 4.3. Геологические эксперименты

Несколько групп экспериментаторов (среди них и советские физики) нашли оригинальный путь, при котором время ожидания продолжалось миллиарды лет. Конечно, сами ученые при этом не присутствовали. Они просто выбирали минерал (возраст которого был сравним с возрастом Земли), содержащий материнский изотоп  $(Z, N)$ , и искали в нем атомы дочернего продукта  $(Z + 2, N - 2)$ , накопившиеся там за это огромное время. Так исследовались переходы селена-82 в криптон-82 и теллура-130 в ксенон-130. Именно инертные газы криптон и ксенон могли быть относительно легко выделены из минерала, даже при микроскопическом их содержании в нем.

Образец размельчался, а газы поступали в специальный прибор — масс-спектрограф. В нем происходило определение изотопного состава инертного газа. И, как правило, обнаруживалось отличие этого состава от обычного, встречающегося в природе. Например, в одном из

последних и наиболее тщательных опытов исследовалась руда с высоким содержанием теллура. Был обнаружен очень большой избыток ксенона-130, его содержание составляло 70% общего количества ксенона, тогда как в атмосфере это содержание всего 4%. Поскольку других аномалий в изотопном составе извлеченного газа не обнаружилось, то было естественно предположить, что такой избыток — результат двойного бета-распада теллура-130, происшедшего с временем жизни  $10^{21}$  лет. Физики доказали также, что  $^{130}\text{Xe}$  не мог образоваться из-за бомбардировки руды космическими частицами в течение почти полутора миллиардов лет (такой возраст имел образец).

Существование двойного бета-распада было подтверждено и другими геологическими (их еще называют масс-спектрометрическими) экспериментами. Но какого именно: двухнейтринного или очень подавленного безнейтринного, этого опыты сказать не могли. И вопрос о механизме распада остался открытым.

Ответ на него мог быть получен только в прямых экспериментах, в которых наблюдались продукты распада. Как мы уже говорили, если бы сумма энергий двух зарегистрированных электронов была постоянной и равной энергии, выделяемой при распаде, это указывало бы на существование безнейтринного процесса и нарушение закона сохранения лептонного заряда. Прямые опыты проводились с самыми разнообразными типами детекторов: камерой Вильсона, фотоэмульсиями, искровой камерой, сцинтилляционными и полупроводниковыми счетчиками.

Начиная с 1951 г. и до наших дней исследователи увеличили чувствительность экспериментов примерно в сто тысяч раз! Несколько раз на протяжении этих лет казалось, что безнейтринный распад обнаружен. Но, через короткое время, опыты, поставленные с теми же изотопами, но с более высокой точностью, опровергали эти оптимистические результаты.

Максимальная оценка на время жизни ядер по отношению к безнейтринному распаду была достигнута в работах группы итальянских физиков под руководством Э. Фиорини. На примере этих исследований мы иллюстрируем работу полупроводниковых счетчиков излучения. Но сначала расскажем о принципе регистрации частиц такими детекторами.

#### 4.4. Полупроводниковый счетчик

Сцинтилляционные счетчики почти ровесники двадцатого века. Через пять лет заработал и первый газоразрядный детектор. Далеким прообразом искровых камер, искровой счетчик Кайффеля был создан в 1948 г. Полупроводниковые детекторы, наверное, ненамного старше читателей этой книги. Столь поздняя дата рождения обусловлена техническими причинами — для производства полупроводниковых детекторов необходимы сверхчистые материалы — германий и кремний. Химики научились выращивать почти беспримесные кристаллы этих элементов только около двадцати лет назад.

Рассмотрим теперь самую простую модель полупроводникового счетчика, состоящую из двух кристаллов полупроводника разных типов. В одном из них содержится некоторое количество свободно перемещающихся по кристаллу электронов. Это — полупроводник *n*-типа (от слова *negative* — отрицательный).

В другом — электроны могут перескакивать только между ближайшими атомами-соседями. Тогда по кристаллу передвигается вакантное место, эквивалентное положительному заряду (отсутствие отрицательного заряда есть заряд положительный). Это вакантное место носит название «дырка». Дырочная проводимость характерна для полупроводников *p*-типа (*positive* — положительный). Итак, два кристалла разных типов соединены воедино. В одном имеются подвижные дырки, в другом — электроны. Такое сочетание будет напоминать соединение двух ящиков с разными газами. Начнет происходить диффузия. Дырки устремятся в полупроводник с электронной проводимостью *n*, наоборот, электроны — в кристалл *p*-типа. Поскольку газ электронов и дырок — заряженный газ, то возникает электрическое поле, которое начнет препятствовать дальнейшей диффузии. Из зоны соприкосновения кристаллов носители заряда разойдутся и она будет, как говорят, обеднена зарядом. Эта зона носит название *p* — *n* (или *n* — *p*)-перехода. Если приложить дополнительно электрическое напряжение к кристаллу так, чтобы еще больше увеличить разность потенциалов между *p*- и *n*-полупроводниками, то обедненная зона расширится.

Именно *p* — *n*-переход и есть основная часть полупроводникового счетчика. Он эквивалентен ионизационной камере, только с твердым наполнителем. Свободных

зарядов здесь мало и в отсутствие ионизирующего излучения течет только малый тепловой ток. Тем меньший, чем больше сопротивление полупроводника (вот зачем нужна чистота материалов!) и чем ниже температура кристалла. При прохождении заряженной частицы она ионизует атомы и в  $p-n$ -переходе появляются свободные заряды. Поле «растягивает» их в разные стороны, и возникающий при этом электрический сигнал может быть зарегистрирован.

Самое привлекательное для физиков свойство полупроводниковых счетчиков — возможность очень точно определять энергию, потерянную частицей в области  $p-n$ -перехода. Хорошее энергетическое разрешение. Оно намного лучше, чем у сцинтилляционных детекторов или газовых ионизационных камер. Для многих задач важно, чтобы при регистрации частиц близкой энергии сигналы от них разделялись — разрешались. Поэтому сразу же после создания полупроводниковые счетчики стали очень широко использоваться.

Основной же недостаток таких детекторов — малое количество вещества в чувствительном объеме, так что для регистрации высокоэнергетических частиц с большим пробегом они не пригодны.

Сигнал от прохождения частицы в детекторе мал. Так, например,  $\alpha$ -частица с энергией 3,5 МэВ образует в  $p-n$ -переходе заряд, равный  $1,6 \cdot 10^{-13}$  Кл. Если емкость детектора 100 пФ, то импульс напряжения на его выходе составит  $u = Q/C = 1,6 \cdot 10^{-3}$  В. Чтобы с большой точностью измерить такой сигнал, пришлось разрабатывать специальные усилители с малым уровнем собственных шумов.

Кроме того, чтобы понизить шумы самого детектора, германиевые счетчики охлаждают до очень низких температур жидким азотом.

Из сказанного видно, что полупроводниковые детекторы удобно применять для определения энергии альфа-частиц или осколков деления тяжелых элементов. В этих целях  $p-n$ -переход делают очень близко от поверхности счетчика, на глубине нескольких микрон, чтобы частица зря не растрачивала свою энергию в его материале. С помощью системы из двух кремневых детекторов можно найти и массу осколка. Схема эксперимента выглядит так. На пути осколков ставится первый счетчик, толщина которого  $\Delta x$  составляет всего десятки микрон, так

чтобы летящая частица оставила в нем лишь небольшую часть своей энергии. Если обратиться к формуле (19) из главы 4, то видно, что на длине  $\Delta x$  потери энергии  $-\Delta E/\Delta x$  обратно пропорциональны квадрату скорости частицы. Второй счетчик выбирается достаточно «толстым» (несколько миллиметров), так что в его  $p-n$ -переходе частица поглощается полностью. Он служит для определения энергии  $E = \frac{1}{2}mv^2$ . Произведение  $(\Delta E/\Delta x)E$  при известном заряде осколка (они при делении вылетают, ионизированными) зависит только от его массы. И эту массу можно найти. Таким образом, среди продуктов деления были обнаружены изотопы с очень интересными ядерными свойствами. Например, изотоп гелия, не с двумя, а с шестью нейтронами, — гелий-8. При делении очень тяжелого калифорния-252 на миллион вылетевших осколков встречается два — три ядра гелия-8 (и тысячи ядер обычного гелия-4). Поскольку тяжелый изотоп так перегружен нейтронами, то за десятую долю секунды он распадается, излучая электроны.

Германиевые полупроводниковые детекторы часто применяются для гамма-спектрометрии. Хотя они и требуют охлаждения, но технические трудности искупаются гораздо большей эффективностью регистрации: и Z германия, и его плотность намного превосходят такие же величины для кремния.

#### 4.5. Опыт Фиорини

В начале этой главы мы говорили о том, что в опытах по изучению двойного бета-распада экспериментальные установки не потрясают своими размерами. Например, искровая камера и сцинтилляционные счетчики в опыте Бардина, Ву и др. занимали в длину около двух метров. Но вот сама установка была опущена в шахту глубиной 600 м для защиты от космического излучения.

В опытах группы Фиорини с германиевым детектором работа шла в Международной лаборатории космических лучей.

Под высочайшим из альпийских пиков — Монбланом — проложен туннель длиной почти двенадцать километров, соединяющий Италию и Францию. На расстоянии четырех километров от итальянского выхода туннеля расположена Лаборатория космических лучей. Сверху ее защищают около двух километров горных пород — тол-

щипа, эквивалентная, по подсчетам физиков, более чем четырьмя километрами воды. Такая мощная защита в миллионы раз ослабляет поток космических мюонов. Схему установки, на которой работала итальянская группа, можно увидеть на рис. 30.

Внешняя защита — парафин — замедляет быстрые нейтроны, рождающиеся при взаимодействии мюонов с веществом или связанные с распадом естественных радиоактивных элементов. Дальше идет слой кадмия — «абсолютно черный», т. е. полностью поглощающий медленные нейтроны. Против гамма-квантов ведет борьбу защита

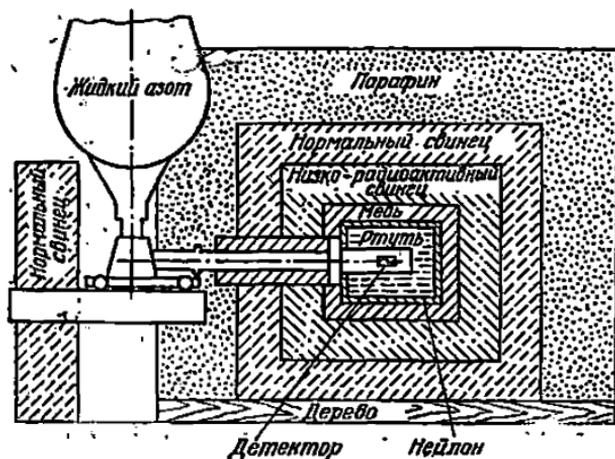


Рис. 30. Схема установки группы Фиорини, с помощью которой искали двойной бета-распад германий-76.

из свинца. Сначала слой обычного свинца, но в нем самом могут быть загрязнений от примесей урана или тория. Кроме того, с развитием атомной промышленности и атомных испытаний многие материалы оказались «зараженными» радиоактивностью. Для человека эта радиоактивность совершенно не заметна — она в сотни и тысячи раз меньше естественного фона, но для таких низкофоновых установок может оказаться опасной. Поэтому внутренний слой свинца специальный — с низким уровнем радиоактивности. Часто такой свинец получают из свинцовых листов, покрывающих крыши старых зданий (церквей или замков). За прошедшие века радиоактивные элементы в них успели распасться, и они не могли «заразиться» от современных материалов. Последний слой массивной защиты —

слой многократно очищенной перегонкой ртути. И, наконец, сердце установки — германиевый детектор.

Через хладопровод низкая температура от дьюара с жидким азотом передавалась на кристалл германия. Этот кристалл выполнял двойную роль. С одной стороны, он служил детектором образующихся электронов, с другой — их источником. Дело в том, что в природном германии содержится около 7,5% германия с атомным весом 76. Он может переходить в селен-76 с излучением двух электронов (в случае безнейтринного распада их суммарная энергия равна 2 МэВ).

Для опытов был выращен уникальный по величине и чистоте кристалл объемом 68 см<sup>3</sup>. Он обладал великолепным энергетическим разрешением. В своих работах группа Фиорини приводит энергетический спектр зарегистрированных событий — многочисленные пики от различных радиоактивных элементов. Но в области 2 МэВ, при общем времени наблюдения 187 суток (!), никаких пиков не наблюдалось. И это дало возможность утверждать, что если двойной безнейтринный распад и происходит, то с временем жизни, превышающим  $5 \cdot 10^{21}$  лет. Закон сохранения лептонного заряда не нарушается чаще чем в 0,1% случаев.

Эксперименты по поиску безнейтринного двойного бета-распада продолжают. В числе экспериментальных групп и советские физики, работающие в г. Киеве. Они получили один из точнейших результатов. Но тоже не обнаружили (пока) этого интересного процесса.

#### 4.6. Вопросы и задачи

43. Многие экспериментаторы искали безнейтринный двойной бета-распад, используя реакцию  $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti} + 2e^-$ . Так, для Е. Матеосяна и М. Гольдгабера химики вырастили специальный сцинтилляционный кристалл из фтористого кальция. В него был введен большой избыток кальция-48. Всего кристалл содержал 11 г этого изотопа. Просматриваемый ФЭУ, он служил одновременно детектором и источником электронов. В результате опытов была получена величина  $\tau_{2\beta} \geq 2,8 \cdot 10^{26}$  лет. Если принять эту границу за точное время жизни, то какое количество сцинтилляционных вспышек за один месяц должны были увидеть экспериментаторы?

(Используйте то, что величина  $1 - e^{-x}$  при малом  $x$  с хорошей точностью равна  $x$ .)

44. Теперь решите похожую задачу для геологических экспериментов. Пусть  $\tau_{2\beta} = 10^{23}$  лет для перехода  $^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe} + 2e^-$ .

Какой объем газа ксенона-127 мог накопиться в образце минерала, образовавшемся 1 миллиард лет назад, если в нем содержится 100 г теллура-128?

45. Для регистрации нейтронов, энергия которых лежит в пределах от 0,1 до 10 МэВ, наиболее распространенным является метод протонов отдачи. Для этого перед полупроводниковым счетчиком ставится полиэтиленовая пленка, на которую падает пучок нейтронов. Какой вид будет иметь распределение импульсов по амплитуде, если нейтроны в пучке имеют одну энергию (многоэнергетический пучок)? Считать, что пробег протонов отдачи полностью укладывается внутри  $p-n$ -перехода.

## Глава 5

### КАК «УСТРОЕНО»

### СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

#### 5.1. Пора подвести некоторые итоги

Прошло пятьдесят лет — срок, приближающийся к длительности человеческой жизни, с того дня, как Энрико Ферми впервые назвал новую частицу ласковым итальянским словом «нейтрино». И за эти годы физики старались не терять времени даром. Им удалось выпытать у природы много тайн, связанных с  $\nu$ . И многие свойства этой частицы были сначала предсказаны, а затем уже получили подтверждение на опыте. Так случилось с самим фактом существования нейтрино и с тем, что в природе есть два различных типа этой частицы — мюонное и электронное. Совсем недавно (об этом мы еще не говорили) к ним прибавилось и тау-нейтрино ( $\nu_\tau$ ), сопровождающее в реакциях открытый на ускорителе  $t$ -лептон. Если учесть, что у каждой из трех названных частиц есть еще и своя античастица, то число известных членов нейтринного семейства достигло шести. Зачем природе понадобились шесть частиц-невидимок — относительно этого полной ясности нет. (Более пессимистическая точка зрения заключается в том, что никакой ясности нет.)

Физики придумали термин «лептонный заряд» и снабдили каждую легкую частицу — лептон — собственным ярлычком. Так появились дополнительные символы в обозначениях различных нейтрино:  $\nu_e$ ,  $\bar{\nu}_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ . И исследования показали, что закон сохранения лептонного заряда выполняется с высокой точностью. Даже в самых тщательных экспериментах его нарушение пока не обнаружено.

Еще одно предсказание, самое невероятное на первый взгляд, оправдалось. Вы помните, опыты подтвердили тот факт, что слабое взаимодействие не сохраняет пространственной четности. Управляемые им процессы в нашем и зеркально отраженном мире идут по-разному. Как следствие этого, появились на страницах журналов изображения нейтрино в виде летящего и вращающегося вокруг вектора скорости шарика или ввинчивающегося в пространство буравчика (см. рис. 24). Они иллюстрируют тот факт, что спин частицы направлен не произвольно в пространстве, а строго по (для  $\bar{\nu}_e$  и  $\bar{\nu}_\mu$ ) или строго против (для  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ ) направления движения (импульса). Пока все сделанные эксперименты подтверждают эту картину. И в то же время работы еще непечатый край и остаются очень актуальными заключительные строки из книги академика М. А. Маркова «Нейтрино», написанные более пятнадцати лет назад: «Современнику трудно гадать, какое истинное место займет нейтрино в физике будущего. Но свойства этой частицы столь элементарны и своеобразны, что естественно думать, что природа создала нейтрино с какими-то глубокими, пока для нас не всегда ясными «целями»».

## 5.2. Взаимодействие

А что известно относительно слабого взаимодействия, в котором участвует нейтрино? Об этом мы уже начали разговор в первой части этой книги (глава 7) и сейчас попытаемся продолжить его. Механизм, с помощью которого осуществляется это взаимодействие, ответственное за распады частиц —  $\mu$ -,  $\pi$ -,  $K$ -мезонов и ряда других, или за рассеяние (например, рассеяние нейтрино на электроны), долгое время оставался загадочным.

Радиус действия слабых сил ничтожно мал даже по сравнению с ядерными масштабами. Последние составляют  $10^{-14}$  м, а первый — меньше, чем  $10^{-17}$  м. Не удивительно, что «рассмотреть», какие частицы переносят слабые взаимодействия и играют ту же роль, что и гамма-кванты в электродинамике, оказалось очень трудным.

Теория бета-распада, которую опубликовал в 1934 г. Э. Ферми, сделала в этом направлении только первый шаг. Уже говорилось, что она была построена по аналогии с электродинамикой, и это оказалось в дальнейшем совершенно правильным. Что же касается механизма слабых

спл, то фермиевская теория рассматривала процесс превращения нуклонов в ядре и рождение  $\beta$ -частицы и нейтрино как бы издалека, не интересуясь его деталями. Считалось, что все происходит в одной точке. И такое приближение было правильно, пока речь шла об ядерном бета-распаде с его, относительно малыми, энергиями ( $< 10$  МэВ).

На вопрос о квантах слабого поля окончательный ответ был получен после создания единой теории электромагнитных и слабых взаимодействий. В нее был вложен труд очень многих ученых, среди которых главную роль сыграли С. Вайнберг, Ш. Глешоу и А. Салам.

Действие разыгрывается в области пространства, в тысячи раз меньшей, чем атомное ядро. Здесь бета-распад нейтрона выглядит так, как это показано на диаграмме (рис. 31, а). Нейтрон, превращаясь в протон, излучает

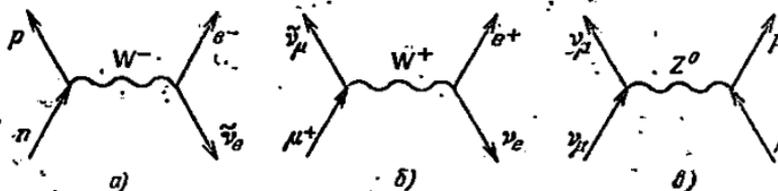


Рис. 31. а) Распад нейтрона происходит через промежуточный векторный бозон (заряженный ток); б) распад положительного мюона (заряженный ток); в) процесс рассеяния нейтрино на протоне. Он осуществляется путем обмена нейтральным бозоном (нейтральный ток).

частицу, — квант слабого поля, которая носит название «векторный бозон» ( $W^-$ ). Эта частица переносит отрицательный заряд и распадается на электрон и нейтрино. Радиус слабого взаимодействия мал и это означает, что масса  $W$ -бозона очень велика (порядка  $10^5$  МэВ), в соответствии с тем, что мы уже обсуждали на стр. 70. Второй член семейства векторных бозонов  $W^+$  можно увидеть на следующей диаграмме, изображающей распад  $\mu^+$ -мезона (рис. 31, б). Наконец, в теории возникли еще два уже нейтральных бозона. Но они не проявляются в отдельности, а всегда только в сочетании друг с другом. Их смещение дает, во-первых, массивную нейтральную частицу  $Z^0$ , а, во-вторых, знакомый нам гамма-квант с нулевой массой покоя. Пока расстояния между частицами малы, обмен  $W^-$ ,  $W^+$ ,  $Z^0$  или  $\gamma$ -квантами приводит к одинаковой

силе взаимодействия. В этом сказывается единая природа слабых и электромагнитных сил. Они выступают с единым по величине зарядом  $e$ , связанным с фермиевской константой слабого взаимодействия и массой бозона соотношением  $G \sim e^2/M_W^2$ . Но вот расстояние между частицами стало больше радиуса слабых взаимодействий. Обмен виртуальными бозонами теперь затруднен. Принцип неопределенности запрещает этим массивным частицам долгое существование и они проникают на большие расстояния с очень малой вероятностью. Гамма-кванты, не обладающие массой, получают в этом случае преимущество. Единые по природе электромагнитное и слабое взаимодействия выглядят «со стороны», как разные виды сил.

Успех единой теории состоял в том, что она смогла решить еще многие сложные вопросы, рассказ о которых увел бы нас далеко за рамки этой книги. Процессы, которые можно объяснить обменом заряженными бозонами  $W^-$  и  $W^+$ , наблюдались и были изучены до создания единой теории \*). Она просто позволила взглянуть на них с новой стороны. Но вот что касается нейтрального тяжелого бозона, то схема Салама — Вайнберга предсказала и его существование, и целый ряд процессов с участием  $Z^0$ , которые еще не наблюдались на опыте (рис. 31, в). Эти реакции получили название процессов с «нейтральными токами», поскольку  $Z^0$  не переносит заряд.

### 5.3. Пузырьковые камеры]

Теория предсказывала существование нейтральных токов и делом экспериментаторов было подвергнуть это проверке опытом. Правда, нейтральные токи в слабых взаимодействиях искали и раньше, но успеха эти поиски не принесли. Теперь же все было снова заряжено энтузиазмом. В середине 1973 г. в печати появилось сообщение из Центра Европейских ядерных исследований (то самое, которое подписали 55 физиков из 7 институтов и шести разных стран: ФРГ, Бельгии, Швейцарии, Франции, Италии и Англии) о том, что нейтральные токи обнаружены. Сделано это было с помощью детекторов, о которых мы еще ничего не говорили, — пузырьковых камер. Они смонтированы на пути пучков крупнейших в мире ускорителей. Многие из камер носят красивые названия:

\*) — Самы векторные бозоны цикто не наблюдад,

«Мирабель», «Людмила», «Гаргамель» и т. п. Однако, за женскими именами скрывается отнюдь не хрупкое «телосложение». Так, собственные размеры «Мирабель» — 1,6 м в диаметре и высота 4,7 м. Эту камеру разработали французские ученые и инженеры и собрали на ускорителе ИФВЭ (Серпухов) для совместных работ с советскими физиками. Камеру окружает вспомогательная аппаратура и объем ее измеряется десятками кубометров, а масса около 3000 т. Магниты, сквозь полюса которых проведены каналы для фотографирования событий. Специальные установки, в которых получается жидкий водород, наполняющий камеру. Множество других приборов.

Цепочки пузырьков, отмечающих след пролетевшей или родившейся частицы, фотографируют несколькими аппаратами. Это делается для того, чтобы потом восстановить его в пространстве — по всем трем координатам. Затем снимки поступают на обработку. Камера может выдавать их десятками тысяч за сутки. Миллионы за год во всем мире. Фотоснимки, фотоснимки, фотоснимки. Еще недавно тысячи людей в лабораториях сидели у просмотровых столиков за проекционными микроскопами<sup>\*)</sup>. Здесь совершался первичный отбор интересных физиков событий. Затем в действие вступали автоматизированные и полуавтоматизированные установки, соединенные с быстродействующими ЭВМ. Надо измерить длины треков, восстановить пространственный вид событий и многое, многое другое. Наконец, исследователи получают нужную информацию и могут строить графики, делать расчеты, что-то подтверждать и от чего-то отказываться. Стоимость такой обработки вместе с созданием необходимой для этого аппаратуры измеряется в семизначных и восьмизначных цифрах и это обходится дороже, чем сами пузырьковые камеры. Есть и еще проблема. Обработка не поспевает за информацией, которую выдают камеры. И последние часть времени либо должны простаивать, либо работать в «архив». А каково хранить такие архивы?

Трудностей много, но какой огромный шаг вперед позволили сделать физике пузырьковые камеры, с тех пор, когда молодой сотрудник Мичиганского университета Дональд Глейвер сконструировал первую из них. Она выглядела совсем не устрашающе. Главная часть — стеклянная ампула с вфиром, объемом всего около 2,5 см<sup>3</sup>.

\*) Сейчас первые этапы обработки тоже автоматизируются.

Жидкость находилась при температуре  $130^{\circ}\text{C}$  и давлении 20 атм. Затем специальным устройством давление сбрасывалось до нормального.

После этого эфир находится в перегретом состоянии. Что это значит? Для начала кипения жидкости, кроме соответствующей температуры и давления, необходимо еще создать условия образования пузырьков пара. Известно, что химики для этого издавна пользуются обрезками стеклянных или фарфоровых трубок, положенных на дно колбы. Так называемыми «кипелками». На них возникают пузырьки и кипение проходит без досадных происшествий. Если не использовать этих мер предосторожности и подогреть чистую, обезгаженную жидкость, то при достижении температуры кипения и дальнейшем ее повышении пар будет образовываться только на поверхности. Жидкость находится в перегретом состоянии. Наконец, в результате появления внутри нее какой-либо неоднородности пузырьки смогут образоваться. Процесс идет очень бурно и часто сопровождается полетом пробки в потолок, а колбы в исследователя.

В камере Глейзера роль «кипелок» отводилась ионам, образующимся на следе частицы. В течение нескольких тысячных долей секунды пузырьки возрастали до видимых размеров. За это время ионы не успевали сместиться на заметное расстояние и цепочка пузырьков точно совпадала с треком частицы. Сфотографировав след, можно сжать жидкость поршнем, пузырьки исчезнут и прибор снова готов к работе.

Первые снимки  $\mu$ -мезона, пролетевшего сквозь камеру, были опубликованы в 1953 г. После этого конструирование и изготовление разных типов пузырьковых камер пошло очень быстрым ходом. Их несомненное преимущество было очевидно — большое количество вещества мишени, следовательно, большая вероятность проваимодействовать с ним проникающему излучению. В качестве жидкостей использовались: жидкий водород, жидкий дейтерий, более сложные жидкости: пропан, фреоны. За десять лет размеры камер увеличились до метра. Следующее десятилетие привело к созданию настоящих гигантов, с которых начался рассказ.

Камеры работают синхронно с импульсами ускорителя. Жидкость находится в сильном магнитном поле, что (так же, как и характер следа) позволяет получать возможно более полную информацию о частице.

## 5.4. Нейтральные токи

Вернемся теперь к нейтринному эксперименту. Пучок мюонных нейтрино попадал в пузырьковую камеру «Гаргамель»<sup>\*</sup>), наполненную десятью тоннами фреона, взаимодействовал с веществом и рождал вторичные частицы. К лету 1973 г. были накоплены сотни тысяч фотографий, из которых отобрали те, что были связаны с нейтрино. Их разделили на две группы. К первой отнесли процессы, в которых среди продуктов реакции обнаруживались заряженные лептоны —  $\mu^+$  или  $\mu^-$ -мезоны. Появление их связано с заряженными токами, в которых переносчиками слабого взаимодействия выступают  $W^+$  или  $W^-$ -бозоны. Во вторую группу отнесли реакции, не сопровождающиеся рождением заряженных лептонов (см., например, рис. 31, в). Число таких событий оказалось незначительно меньше, чем в первой группе, и это убедительно говорило о существовании нейтральных токов и  $Z^0$ -бозона. Теоретические предсказания подтверждались этим экспериментом, но физики не успокоились. Столь фундаментальная теория должна была быть проверена и перепроверена самым тщательным образом и в самых различных опытах. И снова проводились эксперименты и на ускорителях, и на реакторах, и в лабораториях.

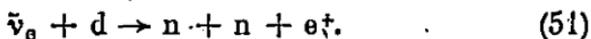
В специальном помещении, в 11 метрах от активной зоны реактора Саванна-Ривер (2000 МВт) помещалась установка, с помощью которой американские физики во главе с Ф. Рейнесом обнаружили существование нейтральных токов. Каждую секунду на  $1 \text{ см}^2$  поверхности этой установки падал поток из  $2 \cdot 10^{13}$  антинейтрино. Он должен был сначала пройти через пассивную защиту из свинца и кадмия, затем миновать бак, содержащий больше двух тонн жидкого сцинтиллятора — активную защиту. И, наконец, антинейтрино попадали в центральную часть, где 10 газовых пропорциональных счетчиков, наполненных гелием-3, пронизывали сосуд с 250 л чрезвычайно чистой тяжелой водой. В отличие от обычной воды, в состав которой входит легкий изотоп водорода  $^1\text{H}$ , в тяжелой он заменен дейтерием —  $^2\text{H}$ . Ядро последнего, состоящее из протона и нейтрона, носит название «дей-

<sup>\*</sup>) Название камеры заимствовано у Ф. Рабле. Гаргамель — мать Гаргантюа («Гаргантюа и Пантагрюэль»).

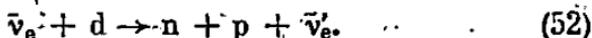
тон» и обозначается  $d$ . Напомним читателю, что «судьба» дейтона во многом аналогична «судьбе» нейтрона. Их существование было предсказано Резерфордом в 1920 г., а экспериментально обнаружили эти частицы в 1932 г. Нейтрон был открыт в Англии, дейтон — в США группой Гарольда Юри. Он получил окончательное признание на том самом VII Сольвеевском конгрессе, который выдал нейтрину «свидетельство о рождении». И вот теперь эти частицы снова должны столкнуться, только не в переносном, а в прямом смысле.

Что при этом произойдет?

Реакция может идти по двум каналам. Один из них определяется заряженными токами и состоит в том, что протон, входящий в состав дейтона, превращается в нейтрон и позитрон:



Если существуют нейтральные токи, то возможен и такой процесс, когда падающее антинейтрино разбивает, разваливает дейтон на составляющие части, освобождая протон и нейтрон:



В обоих случаях экспериментаторам надо зарегистрировать нейтроны — два, если происходила реакция (51), и один, когда дейтон просто разваливался. Для этого и пронизывали тяжелую воду гелиевые счетчики. Использовалось их основное свойство — эффективная регистрация нейтронов при ничтожной чувствительности к гамма-излучению. Собственный фон таких счетчиков в основном связан с альфа-частицами естественной радиоактивности, которые вылетают из их стенок. Эксперимент, который мы описываем, был поставлен в 1979 г. Он был далеко не первым из реакторных опытов, в которых искались нейтральные токи. Поиск начался еще в 1956 г., но тогда чувствительность установки оказалась почти в сто тысяч раз меньше, чем нужно. Пришлось менять методику и в 1969 г. эта цифра упала до тысячи, в 1974 г. оставалось поднять чувствительность всего в 10 раз. Опять исследователи переделывали установку. В опытах 1979 г. более чем за 100 суток измерений эффекта и фона было получено, что счет событий, вызванных нейтральными токами, около 40 в день, а заряженными ~7 в день. Это совпадало по порядку величины с предсказаниями теории.

Можно написать дифференциальные уравнения этих процессов, решить их и получить математическое описание той картины, которую мы только что описывали. Эти уравнения всеобъемлющи, в том смысле, что описывают поведение любых подобных систем, маятники ли

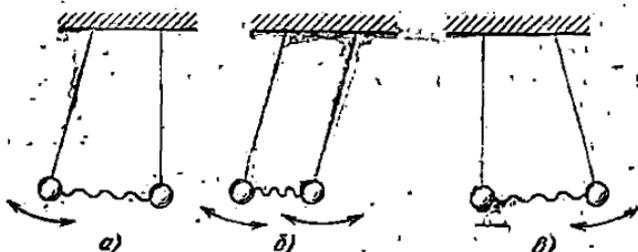


Рис. 32. Качающиеся связанные маятники. Их движение описывается теми же уравнениями, что и нейтринные осцилляции.

это, два ли колебательных контура в электрической схеме, просто ли две системы — система I и система II. Они говорят о том, что если системы I и II независимы, то и периодические процессы в них независимы. Но стоит между системами появиться какой-либо слабой связи, какому-то взаимодействию — и возникает процесс, который мы так хорошо можем наблюдать на примере маятников. Энергия перетекает от системы I к II и от II к I, тоже совершая колебания.

Теперь надо сделать скачок во времени, в 60-е годы XX века, когда этот математический аппарат пригодился для нейтрино. Идея о возможности нейтринных осцилляций (\*), как и очень многие идеи в физике слабых взаимодействий, принадлежит Б. Понтекорво. Разберем ее на таком примере: Пусть из активной зоны ядерного реактора вылетает электронное антинейтрино  $\bar{\nu}_e$ . Если закон сохранения лептонного заряда абсолютно точен, то с антинейтрино ничего не происходит. Оно соответствует системе I, а скажем, мюонное антинейтрино  $\bar{\nu}_\mu$  — системе II, и системы эти существуют независимо. (Точнее, второй системы в реакторе просто не существует.) Но если «сое-

\* ) Первоначально осцилляции нейтрино были введены Б. Понтекорво по аналогии с осцилляциями нейтральных K-мезонов. Но о последних мы не будем рассказывать, поскольку с развитием этой идеи выяснились многие интересные особенности, присущие только нейтринным осцилляциям.

динить их пружиной» — допустить, что есть взаимодействие, иногда нарушающее этот закон, то окажется возможным переход  $\bar{\nu}_e \rightleftharpoons \bar{\nu}_\mu$ , т. е. нейтринные осцилляции. Поток электронных антинейтрино постепенно начнет представлять собой некую смесь из  $\bar{\nu}_e$  и  $\bar{\nu}_\mu$ , потом останутся только  $\bar{\nu}_\mu$  \*), затем начнется обратный переход и т. д. Все как для связанных маятников. Для существования осцилляций необходимо еще одно важное условие. Нейтрино должно иметь хоть малую, но все же конечную массу и, следовательно,  $v < c$ . Иначе даже при нарушении закона сохранения лептонного заряда переходы между различными сортами нейтрино окажутся запрещенными теорией относительности.

Обнаружить нейтринные осцилляции чрезвычайно интересно. Их существование означало бы не только приближенность закона сохранения лептонного заряда и существование массы у нейтрино. Оно говорило бы и о том, что природа подарила нам еще один чрезвычайно красивый эффект и человек смог предсказать его. Вот и протянулась виточка познания от XVI века до XIX. От расквашивающихся паникадил до огромных современных установок.

Сейчас, следуя уже выработанным на страницах этой книги традициям, автору пора бы перейти к описанию эксперимента, в котором физики зарегистрировали новый эффект. Но он не может это сделать. И по весьма уважительной причине. Осцилляций пока никто не наблюдал.

Существует ряд косвенных данных, которые подталкивают физиков на их поиски. Прежде всего «нехватка» солнечных нейтрино. Как мы уже говорили, величина их потока, которая регистрируется в опытах группы Дэвиса, меньше, чем ожидается по астрофизическим расчетам. Может быть, это связано с ошибками этого труднейшего эксперимента. Может быть, следует еще раз скорректировать расчеты. Но если разница объективно существует, то можно ожидать, что на своем пути от Солнца к Земле часть  $\nu_e$  перейдет в  $\nu_\mu$  ( $\nu_\tau$ ). Последние не смогут превратить атомы хлора-37 в аргон-37. Эта проблема, конечно, прояснится со временем. Возможно, после того, как войдет в строй вторая очередь нейтринной лаборатории Академии наук, расположенной в Боксанском ущелье.

\* ) При некоторых условиях переход может происходить и не полностью.

Новые детекторы солнечных нейтрино позволят точнее ответить на вопрос о существовании осцилляций.

Итак, поиски ведутся. Несколько групп экспериментаторов занимаются измерениями на реакторах или готовятся к таким измерениям. Это и американские физики из Ирвинского университета (группа Ф. Рейнеса), и европейские ученые из Института Лауэ — Ланжевена в Гренобле (группа, которой руководит лауреат Нобелевской премии Рудольф Мёссбауэр) и советские исследователи. Идея экспериментаторов состоит в следующем. Детектор, который может регистрировать процесс обратного бета-распада  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ , помещается недалеко от реактора. Если осцилляции происходят достаточно быстро и их длина составляет метры или десятки метров, то часть  $\bar{\nu}_e$  перейдет в  $\bar{\nu}_\mu$ , пока они долетят до детектора. Мюонное нейтрино не вызывает реакции обратного бета-распада. Детектор их «не чувствует». Тогда число зарегистрированных событий уменьшится по сравнению с предсказаниями теории. Еще более убедительное и наглядное доказательство существования осцилляций можно получить, если измерять энергетический спектр позитронов бета-распада (а значит, и падающих антинейтрино) на различных расстояниях от ядерного реактора. Все дело в том, что  $\bar{\nu}_e$  с большой энергией должны пролететь и большее расстояние, чтобы превратиться в  $\bar{\nu}_\mu$ , чем антинейтрино с малой энергией. Последние «вымирают» быстрее. И, отодвигая детектор, экспериментаторы могут увидеть, как будет уменьшаться число позитронов с малой энергией по отношению к энергичным  $e^+$ .

Физики из Института Лауэ — Ланжевена собираются осуществить этот опыт с помощью перемещающейся по рельсам железнодорожной платформы, на которой будет смонтирована их многотонная установка. Поиски осцилляций Понтекорво ведутся и в глубоких подземных лабораториях, в которых регистрируются нейтрино, рождающиеся в атмосфере, и на ускорителях высоких энергий. Обсуждался проект, в котором предполагается поместить детектор на расстояние около тысячи километров от ускорителя. Ускоритель находится в США (Батавия), а детектор в Канаде. Благодаря тому, что пучок высокоэнергетических нейтрино достаточно узкий, можно надеяться зарегистрировать поток этих частиц. Такой эксперимент позволил бы заметить осцилляции с очень большой длиной.

Остается ждать результатов!

## 6.2. Проект ДЮМАНД

Фундаментальные знания о строении материи физики получали и получают, используя частицы больших энергий. Все дальше стремятся ученые проникнуть в глубь вещества и для этого обстреливают его на ускорителях протонами, мезонами, нейтрино все больших энергий. Уже проектируются и в ближайшем будущем начнут строиться машины, в которых протоны разгоняются до энергий в несколько ТэВ ( $1 \text{ ТэВ} = 10^6 \text{ МэВ} = 10^{12} \text{ эВ}$ ). Но это отнюдь не простое и тем более не дешевое решение задачи. Мы уже говорили о том, что постройка гигантских ускорителей часто не под силу одной, даже развитой, стране. Поэтому физики не оставляют своим вниманием и тот «бесплатный ускоритель», который постоянно работает во Вселенной, направляя на Землю потоки быстрых космических частиц. Откуда они берутся? Ученые сейчас считают, что источником космических частиц могут быть взрывы массивных звезд. Огромная температура и давление, возникающие при взрыве, выбрасывают вещество звезды во Вселенную со скоростью, близкой к скорости света. Этот процесс сопровождается гигантской вспышкой, когда видимая яркость звезды возрастает в миллиарды раз. Астрономы говорят: «Вспыхнула сверхновая». Такую вспышку в созвездии Змееносца наблюдал, например, Иоганн Кеплер в 1604 г. К сожалению, первый из телескопов был сконструирован в Голландии на пять лет позже, потом появилась зрительная труба Галилея и только в 1611 г. Кеплер описал изобретенный им телескоп. Сейчас — дело иное. Мощные телескопы приближают к нам самые удаленные галактики и сверхновые регистрируются в среднем один раз за несколько месяцев (около 400 вспышек за последние 90 лет).

Космические лучи по своим энергиям иногда обгоняют даже фантастические проекты ускорителей. В них встречаются частицы с энергией, превышающей  $10^{20}$  эВ. При взаимодействии частиц с межзвездным веществом (или с молекулами воздуха в атмосфере Земли) рождаются и нейтрино сверхвысоких энергий. Конечно, быстрых частиц очень мало и, соответственно, ничтожно мала интенсивность возникающих  $\nu$  с  $E_\nu = 10^{18} - 10^{19}$  эВ (по сравнению с пучком ускорителя). И тем не менее только нейтрино сверхвысоких энергий способны донести до нас рассказ о далеких областях Вселенной. Ведь для этого

надо преодолеть расстояние в миллиарды световых лет, не поглотившись в межзвездном веществе. Кроме того, с помощью космических нейтрино можно изучать взаимодействие этих частиц с веществом при огромных энергиях.

Теперь, если читатель внимательно прочел эту книгу (за что автор выражает ему благодарность), он может сыграть сам с собой в «угадайку». Назвать по аналогии с предыдущим, скажем, три требования к детекторам космических нейтрино, без выполнения которых нельзя надеяться на удачу. А теперь проверить ответы.

1. Огромная масса вещества.

2. Хорошая защита от фона.

3. Применение различных «хитростей», чтобы отличить событие, вызванное нейтрино, от любого другого.

Но вряд ли читателю удастся догадаться, о какой массе может идти речь. Оценить поток нейтрино и вероятность их регистрации довольно трудно. Но при всем оптимизме не стоит надеяться на счет, больший нескольких штук за миллион лет, для  $E_\nu > 10$  ТэВ и массе детектора в 1 т. Уныние от этой цифры не скрашивается даже самыми благоприятными прогнозами человеческого долголетия. Попытаемся обойти эту трудность с другой стороны. Возьмем миллион тонн сцинтиллятора и несколько миллионов ФЭУ. Однако, кроме технических трудностей, здесь возникнут непреодолимые финансовые. Изготовление детектора станет в «копеечку» (умноженную на коэффициент  $10^{12} \div 10^{13}$ ). Тем не менее, руки у физиков не опустились и плодом раздумий ученых явился проект глубоководного детектирования мюонов и нейтрино — Deep Underwater Muon Neutrino Detection (ДЮМАНД).

Возможность детектирования нейтрино и мюонов глубоко под водой рассматривалась в Советском Союзе. Затем, в 1975 г., группа американских физиков, работающих в университетах и в Национальной ускорительной лаборатории, выдвинула аналогичный проект, который и назвали ДЮМАНД. После этого в СССР и США началась его более детальная проработка. Образован оргкомитет и периодически созываются международные совещания, на которых обсуждаются результаты расчетов, модельные эксперименты и идеи оригинальных детекторов.

В 1977 г. в журнале «Успехи физических наук» был опубликован обзор В. С. Березинского и Г. Т. Зацепина, посвященный ДЮМАНД. Мы воспользуемся приведен-

ными там описаниями проектов двух детекторов. Первый — оптический: В океане на глубине 5 км расположен детектор объемом в  $1 \times 1 \text{ км}^3$  ( $10^9 \text{ т}$ ). Это кубическая решетка, имеющая шаг около 15—20 м. В узлах решетки крепятся фотоумножители. Предполагают, что детектор можно будет смонтировать в океанской долине недалеко от Гавайских островов. Как обнаруживают полезное событие в такой установке? Нейтрино сверхвысокой энергии должно передать значительную часть этой энергии другим частицам. Те в свою очередь сталкиваются с ядрами, электронами, рождают пары и излучают фотоны. Так образуется ядерно-электромагнитный ливень. Все множество вторичных частиц несетя по направлению движения первичной частицы. При этом быстрые электроны, присутствующие в ливне, испускают черенковское излучение. Его и регистрируют фотоумножители. По тому, с каких ФЭУ поступили сигналы и какой они величины, можно получить информацию и об энергии нейтрино, и о месте возникновения ливня, и о направлении его распространения. Все это поможет и выделить полезные события среди других. Как ни велика толща воды над детектором, все же сюда могут проникнуть мюоны огромных энергий.

Другой метод регистрации  $\nu$  очень больших энергий, совершенно необычный, предложили Г. А. Аскарьян и Б. А. Долгошеин. Они решили, что нейтрино можно не только «увидеть» (с помощью ФЭУ), но и «услышать». Точнее, услышать звук от ливня заряженных частиц, образовавшегося под действием нейтрино. Большое выделение энергии в ливне приводит к мгновенному местному разогреву воды, возрастанию ее объема и распространению в глубине океана звуковых волн. Если свет, по оценкам ученых, поглощается в морской воде на расстоянии нескольких десятков метров, то звук проходит дальше. И вот, в одном из проектов предполагается создать в океане установку, содержащую сто тысяч чувствительных гидрофонов, расположенных в виде кубической решетки. Расстояние между соседними гидрофонами 100 м. Размеры детектора  $10 \times 10 \times 1 \text{ км}^3$  (глубина). Тогда его масса в сто раз превзойдет черенковский детектор и составит  $10^{11} \text{ т}$ , так что за год можно надеяться «услышать» тысячу нейтрино с энергией, большей  $10^{18} \text{ эВ}$ . При каждом событии, в среднем, будет срабатывать 50 гидрофонов. Звуковая регистрация позволяет определять энергию  $\nu$  (сила

звука пропорциональна энергывыделению в ливне), место возникновения ливня и направление движения нейтрино.

Длительность импульса звука чрезвычайно мала и это тоже поможет выделить его среди других шумов моря.

В каком виде предстанет окончательная установка ДЮМАНЦ, какие интересные сведения о нейтрино и о Вселенной удастся получить с помощью этого проекта — дело будущего. Будем надеяться, не очень отдаленного.

### 6.3. Практика и нейтрино

Самые различные специальности уже «освоили» и продолжают «осваивать» элементарные частицы. Мы давно привыкли к тому, что область применения ядерной физики стала почти необъятной. Начиная от огромных электростанций и кончая криминалистикой или проблемой искусственного сердца. А нейтрино, одна из немногочисленных стабильных частиц (кроме нее, не распадаются электрон, протон, гамма-квант и их античастицы), совсем не подходит для практических нужд. Природа создала на этом пути барьер — ничтожную вероятность взаимодействия  $\nu$  с веществом. Барьер, который долгие годы казался непреодолимым. Конечно, работа над созданием нейтринных детекторов была полезна для других разделов физики или техники — достаточно вспомнить жидкие сцинтилляторы большого объема и проблему определения радиоактивности человека. Но все это были лишь косвенные заслуги. Только в самые последние годы родились идеи, благодаря которым «недостатки» нейтрино могли перейти в «достоинства». Перевоплощение, которое встречается не только в мире элементарных частиц.

Мы поговорим только об одном из проектов. Он связан с проблемами атомной энергетики. Слова «атомная энергетика» всем теперь знакомы и привычны. Трудно себе представить, что лишь несколько десятилетий отделяют нас от того дня, когда физики впервые стали размышлять о возможности преобразования энергии деления урана в тепловую и электрическую энергию. Как правило, новое дело вызывает у многих сомнения, а часто и сопротивление. Так было и на этот раз.

«Еще в 1948 г. при решении урановой проблемы возникали идеи развития атомной энергетики. В те времена эта идея встречала в лучшем случае улыбки. Считалось, что это «развлечение» ученых, которое никогда не будет

иметь практического смысла», — вспоминал академик А. П. Александров. И тем не менее, Игорь Васильевич Курчатов, его сотрудники и его ученики верили, что мирный атом необходим людям и доказали свою правоту. Первая атомная электростанция (АЭС), совсем небольшой мощности — 50 тысяч киловатт, начала работать летом 1954 г. Ее построили недалеко от Москвы в городе Обнинске. Шли годы и новый источник энергии завоевывал все большее признание. Сейчас уже сотни АЭС, мощность каждой из которых исчисляется сотнями и тысячами мегаватт, работают в мире.

Новая отрасль энергетики требует от ученых и инженеров возможно более полного знания того, как происходит выработка энергии, что делается внутри атомного реактора. Ведь чем полнее и точнее эти данные, тем экономнее можно расходовать дорогое ядерное топливо, тем дешевле и надежнее можно сконструировать реактор. А как все это узнать? Как взглянуть внутрь аппарата, где властвуют огромные радиоактивности, высокая температура и, часто, высокое давление? Разработаны и используются самые разные детекторы. Они регистрируют излучение, но должны быть расположены вблизи активной зоны реактора — зоны, в которой и происходит цепная реакция деления. Потому что дальше все частицы поглощаются в специальной защите — ведь надо остудить «ядерный огонь». Все частицы, кроме нейтрино. Оно свободно проникает через защиту и, как показали советские физики, несет интересную информацию о том, что происходит в активной зоне. Детектор, расположенный в нескольких десятках метров от нее, будет видеть внутренность реактора в «нейтринном свете».

Если осуществить такой проект, то человек впервые получит прямую практическую пользу от этой, как казалось многие годы, неуловимой частицы.

## Глава 7

### СОВСЕМ КОРОТКОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассказ о детекторах и нейтрино подошел к концу. Хотя описание многих методов регистрации элементарных частиц приведены на страницах этой книги, о целом ряде других ничего не сказано. Так же как и о многих экспериментах с нейтрино. О том, что, возможно,

обнаружена масса у этой частицы, в десятки тысяч раз меньшая, чем у электрона, но все же конечная. О регистрации нейтрино, рождающихся в атмосфере. О планах создать «нейтринный телеграф». Тому, кто заинтересуется этими вопросами, можно посоветовать обратиться к журналам «Квант», «Наука и жизнь», «Природа», в которых ученые популярно рассказывают о последних известиях с «нейтринного фронта».

Мне хочется закончить книгу теми же словами, с которых она началась:

«Природа неистощима в своих выдумках» (И. Ньютон).

«И это чудо, что, несмотря на поразительную сложность мира, мы можем обнаруживать в его явлениях определенную закономерность» (Э. Шредингер).

## ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ

1. Рассмотрим систему из массивной звезды — Солнца и двух планет  $m_1$  и  $m_2$ , которые вращаются около нее по круговым траекториям с радиусами  $r_1$  и  $r_2$ . Пусть скорости планет  $v_1$  и  $v_2$ . Силы притяжения их к Солнцу относятся между собой, как

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{m_1 v_1^2}{r_1} : \frac{m_2 v_2^2}{r_2} \quad (1)$$

Из третьего закона Кеплера  $(T_1/T_2)^2 = (r_1/r_2)^3$  или  $(2\pi r_1/v_1)^2 \times (2\pi r_2/v_2)^{-2} = r_1^3/r_2^3$ , отсюда

$$v_1^2/v_2^2 = r_2/r_1. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{m_1}{r_1^2} : \frac{m_2}{r_2^2}.$$

Поэтому сила тяготения планеты к Солнцу прямо пропорциональна ее массе и обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами:  $F = cm/r^2$ , где  $c$  — постоянная, характерная для всех планет этой системы.

2. Предположим, что падающее тело — второй спутник Земли, который движется по очень вытянутому эллипсу. Длина большой полуоси этого эллипса равна расстоянию от Земли до Луны ( $R$ ), а малой — пренебрежимо мала, так что через  $1/2$  оборота тело упадет на Землю. Луна движется по круговой орбите с радиусом  $R$  (большая полуось  $2R$ ). Тогда согласно третьему закону Кеплера  $T_{Л-З}^2/T_{т-З}^2 = (2R)^3/R^3$ , где  $T_{Л-З}$  — период обращения Луны вокруг Земли, а  $T_{т-З}$  — период обращения тела. Время падения  $t = 1/2 T_{т-З} = 1/2 T_{Л-З} \sqrt{R^3/8R^3} \approx 5$  суток.

3.  $4,4 \cdot 10^{40}$ .

4. Воспользуемся выраженном (8) для полной энергии в задаче двух тел

$$E = \frac{mv_{\parallel}^2}{2} + \frac{L^2}{2mr_{12}^2} - \frac{\alpha}{r_{12}}.$$

В нашем случае  $E = \text{const}$ , при  $r_{12} = a_1$  и  $r_{12} = a_2$  составляющая скорости  $v_{\parallel} = 0$ ,  $\alpha = \gamma m M_3$ ,  $L = \text{const}$ . Отсюда

$$2ma_1^2 E = L^2 - 2\gamma m^2 M_3 a_1 \quad (1)$$

и

$$2ma_2^2 E = L^2 - 2\gamma m^2 M_3 a_2. \quad (2)$$

Разделив почленно (1) на (2), найдем, что

$$L = \sqrt{2\gamma m^2 M_3 \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2}}.$$

5. Используем симметрию задачи. Осколки совершенно одинаковы и взаимозаменяемы. Тогда второй из них должен иметь ту же по величине скорость и вылететь под тем же углом к направлению полета ядра, что и первый. Задачу можно решить и воспользовавшись законом сохранения импульса. Перейдем в систему отсчета, в которой ядро до распада покоилось. Тогда осколки должны вылететь под углом  $180^\circ$  друг к другу. Для перехода в лабораторную (первоначальную) систему отсчета необходимо прибавить к векторам скоростей осколков по одинаковому вектору  $v$  (скорость ядра). Очевидно, что  $|v_1| = |v_2|$  и углы вылета равны.

6. Выполним некоторые преобразования. Умножим обе части равенства (18) на скорость частицы  $v = \Delta z / \Delta t$ , тогда

$$m \frac{\Delta v}{\Delta t} v = -q \frac{\Delta \phi}{\Delta x} \frac{\Delta x}{\Delta t} = -q \frac{\Delta \phi}{\Delta t}.$$

Для малых  $\Delta t$  величину  $m \Delta v \cdot v$  можно представить как  $\Delta(1/2 m v^2)$ , откуда

$$\frac{\Delta(1/2 m v^2)}{\Delta t} + \frac{\Delta(q\phi)}{\Delta t} = \frac{\Delta(1/2 m v^2 + q\phi)}{\Delta t} = 0.$$

Но если изменение величины  $\Delta(1/2 m v^2 + q\phi)$  с изменением времени равно нулю, то сама величина  $1/2 m v^2 + q\phi$  остается постоянной. Мы взяли совершенно произвольный промежуток времени, и, очевидно, что в процессе всего движения  $1/2 m v^2 + q\phi = \text{const}$ , что и требовалось доказать, поскольку в электростатическом поле эта величина и есть полная энергия  $E$ .

7. Если движение происходит по закону  $x = x_0 \sin \omega t$ , то скорость заряда  $(x)' = v = x_0 \omega \cos \omega t$ , а ускорение  $(v)' = a = -x_0 \omega^2 \sin \omega t$ . Интенсивность излучения пропорциональна квадрату ускорения  $I \sim a^2$ , следовательно,  $I \sim \omega^4$ .

8. Пусть заряд  $q$  находится в точке  $A$  тонкой равномерно заряженной сферы (рис. 33, а). Вырежем узкий конусом, вершина которого совпадает с точкой нахождения тела, участок поверхности сферы, площади которых равны соответственно  $\Delta S_1$  и  $\Delta S_2$ . Кулоновская сила, действующая на заряд со стороны первого участка (рис. 33, б),  $F_1 = \rho \Delta S_1 / (4\pi \epsilon_0 R_1^2)$ , где  $\rho$  — плотность заряда (Кл/м<sup>3</sup>) на сфере. Со стороны второго участка действует сила  $F_2 = \rho \Delta S_2 / (4\pi \epsilon_0 R_2^2)$ . Направления сил — противоположны, а соот-

поение их величин  $\frac{F_1}{F_2} = \frac{\Delta S_1}{\Delta S_2} \frac{R_2^2}{R_1^2}$ . Легко показать, что

$$\frac{\Delta S_1}{\Delta S_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} = \frac{R_1^2}{R_2^2}. \text{ Отсюда } F_1/F_2 = 1, \text{ т. е. силы компенсируются.}$$

Таким же образом, разбивая всю сферу на малые участки, мы найдем, что полная сумма сил, действующих на заряд, равна нулю, т. е.

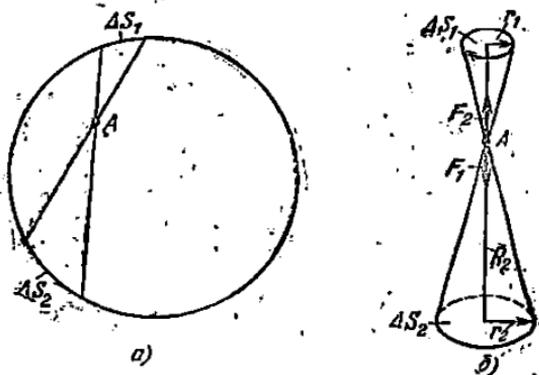


Рис. 33.

внутри сферы поля нет. Необходимое условие этого — обратная пропорциональность величины силы квадрату расстояния между заряда и. Этот вывод будет верен для сферической оболочки любой толщины, так как мы можем разбить ее на  $n$  тонких оболочек и для каждой провести изложенное выше доказательство.

9. Пусть электрон, находящийся внутри капли из положительно заряженной жидкости, смещен на расстояние  $r$  от ее центра. Это изображено на рис. 34. Со стороны внешней оболочки, заключенной между  $r$  и радиусом ядра  $R$  (как это было показано в предыдущей задаче), силы на частицу не действуют. Остается шар радиуса  $r$ . Если плотность заряда в жидкости  $\rho$ , то на электрон действует сила

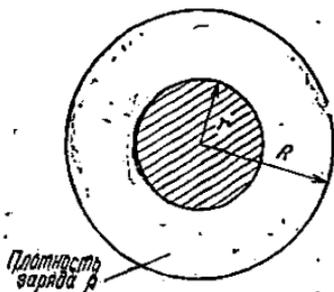


Рис. 34.

$$F = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_m e}{r^2} = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4\pi r^3 \rho e}{3r^2} = - \frac{\rho e}{3\epsilon_0} r = \text{const} \cdot r.$$

10. Кулоновская сила притяжения обеспечивает движение электрона по окружности:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$$

Отсюда  $v = \sqrt{e^2/(4\pi\epsilon_0 m_e r)} = 2,2 \cdot 10^8$  м/с.

11. Используем закон радиоактивного распада  $N = N_0 e^{-t/\tau}$ . Возьмем натуральный логарифм от обеих частей равенства. Тогда

$$t = \tau \ln \frac{N_0}{N} = 8 \cdot 10^3 \text{ лет} \cdot \ln 2 = 5,5 \cdot 10^3 \text{ лет}.$$

12. Для колечка, у которого все его части находятся на одинаковом расстоянии  $r$  от центра вращения, момент количества движения будет равен  $mvr$ . С другой стороны, этот момент и есть спин. Электрон — фермиевская частица, его спин равен  $\frac{1}{2}\hbar$ . Приравнявая эти выражения, получим  $v = \hbar/(2mr) = 5,5 \cdot 10^{10}$  м/с. Это больше, чем скорость света. Если мы воспользуемся формулами теории относительности, в которых масса частицы зависит от скорости:

$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$ , то  $\frac{m_0 v r}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{\hbar}{2}$ . Отсюда можно найти энергию вращающегося электрона (энергию покоя), считая  $v \approx c$ :

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \approx \frac{c\hbar}{2r} \approx 100 \text{ МэВ},$$

что в 200 раз превышает известную из опыта величину.

13. Когда происходит деление и из одного тяжелого ядра образуются два осколка, то в их электронных оболочках много вакантных мест — они сильно ионизированы. При прохождении через эмульсию, постепенно теряя свою скорость, осколок в конце пути движется уже так медленно, что успевает «подхватить» чужие электроны от атомов среды. Заряд осколка уменьшается и уменьшается его способность образовывать скрытые центры изображения. Итак, в конце пути след осколка становится менее плотным, сужается. Отсюда ясно и направление его полета.

14. В конце своего пути электрон уже растерял энергию и движется медленно. Сталкиваясь с электронами среды, он сильно меняет направление своего движения. Поэтому на рисунке электрон движется от точки  $P$  к точке  $Q$ .

15. Самая маленькая длина волны  $\lambda = 3 \cdot 10^{11}$  м и соответствует самой большой энергии  $h\nu$ . В этом случае электрон практически полностью теряет свою энергию, передав её тормозному кванту. Отсюда  $h\nu = eu$ , где  $e$  — заряд электрона и  $u$  — разность потенциалов, разгоняющая его:

$$u = \frac{h\nu}{e} = \frac{hc}{e\lambda} \approx 40 \text{ кВ}.$$

Вольфрам используют в качестве тормозящего вещества по ряду причин. Во-первых, он обладает большим порядковым номером ( $Z = 74$ ), во-вторых, пластина сильно разогревается, а вольфрам очень тугоплавкий материал.

16. Воспользуемся теми немногими формулами из теории относительности, которые были приведены во второй главе. Если полная энергия электрона  $E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$ , а энергия покоя  $m_0 c^2$ , то кинетическая энергия

$$K = E - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right).$$

Скорость света в воде  $c_n = c/n$ . Как известно, условие возникновения черенковского излучения состоит в том, что скорость электрона должна быть больше скорости света в среде и

$$K > m_e c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (1/n)^2}} - 1 \right) = \\ = 0,511 \text{ МэВ} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (1/1,6)^2}} - 1 \right) \approx 0,26 \text{ МэВ}.$$

17. Обратимся к законам сохранения энергии и импульса. Для энергии

$$h\nu = E_0 = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

(мы берем общий случай, когда скорость электрона, вылетевшего после фотоэффекта, может быть и сравнимой со скоростью света). Для импульса

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{m_e v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Если почленно разделить первое уравнение на второе, то получаем  $c = c^2/v$ , откуда  $v = c$ . Результат этот не имеет смысла. Для одновременного выполнения законов сохранения необходимо, чтобы часть импульса и энергии кванта воспринял атом как целое.

18. Воспользуемся законом Эйнштейна для фотоэффекта

$$E_0 = h\nu - E_{\text{вых}},$$

где  $\nu = c/\lambda$ ,  $E_0 = hc/\lambda - E_{\text{вых}}$ . Граничная энергия квантов, при которой станет возможным фотоэффект,  $E_{\text{гр}} = hc/\lambda \geq E_{\text{вых}}$ . Подставляя данные задачи, получим  $E_{\text{вых}} \approx 4 \text{ эВ}$ .

19. На рис. 35 приведена схема комптоновского рассеяния. Гамма-квант с первоначальной энергией  $h\nu$  и импульсом  $h\nu/c$  после столкновения со свободным электроном (электроном, энергия связи которого много меньше переданной ему квантом) рассеивается и отле-

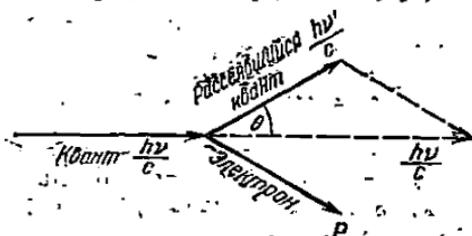


Рис. 35

тает под углом  $\theta$  к первоначальному направлению. Электрон приобретает импульс  $p$  и энергию  $K = h\nu - h\nu'$ , где  $\nu'$  — частота рассеявшегося кванта. Для нахождения изменения длины волны кванта  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  воспользуемся законами сохранения и довольно искус-

ственными математическими преобразованиями. Сохраненно импульса дает возможность найти  $p$  из треугольника  $ABC$  по формуле косинусов:

$$p^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h\nu}{c}\frac{h\nu'}{c}\cos\theta.$$

Из закона сохранения энергии  $K = h\nu - h\nu'$ . Возведем последнее равенство в квадрат:

$$K^2 = (h\nu)^2 + (h\nu')^2 - 2(h\nu)(h\nu'),$$

и вычтем его почленно из первого (предварительно умножив первое на  $c^2$ ). Получаем

$$p^2c^2 - K^2 = 2(h\nu)(h\nu')(1 - \cos\theta).$$

С другой стороны,

$$p^2c^2 - K^2 = m^2v^2c^2 - \frac{1}{2}m^2v^4 = \frac{1}{2}mv^2(2mc - \frac{1}{2}mv^2).$$

Поскольку  $c \gg v$ , последним членом в скобках пренебрегаем, а  $\frac{1}{2}mv^2 = K$  заменяем на  $h\nu - h\nu'$ . Тогда

$$(h\nu - h\nu')2mc^2 = 2(h\nu)(h\nu')(1 - \cos\theta).$$

Разделив обе части равенства на  $h\nu\nu'mc$ , получим окончательно

$$\frac{c}{\nu'} - \frac{c}{\nu} = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta),$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta).$$

20. На максимальное расстояние по вертикали успевали опуститься нейтроны с минимальной кинетической энергией  $K = 5 \cdot 10^{-3}$  эВ. Таким образом, задача эквивалентна задаче по механике, в которой тело с энергией  $K$  бросили горизонтально и оно на расстоянии  $l$  опустилось на  $\Delta h$ :  $\Delta h = \frac{1}{2}at^2$ , где  $t = l/v = l/\sqrt{2K/m}$  и  $a$  — ускорение свободного падения нейтрона в поле Земли:  $a = \frac{4K\Delta h}{ml^2} \approx 9,8$  м/с<sup>2</sup>, что с хорошей точностью совпадает (с учетом ошибок эксперимента) с величиной  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>.

21. Поскольку требуется лишь оценка, то возьмем

$$m = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг и } R = 10^{15} \text{ м;}$$

$$\rho = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi R^3} = 4 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3 = 4 \cdot 10^{14} \text{ т/м}^3,$$

плотность же свинца  $1,13 \cdot 10^4$  т/м<sup>3</sup>.

22. Рассмотрим сначала центральный удар двух упругих шариков. В этом случае движение одномерное — все происходит вдоль одной оси. Воспользуемся законами сохранения импульса и энергии (спроектировав все векторы на ось движения):

$$\begin{cases} K_n = K'_n + K'_B, \\ p_n = p'_n + p'_B \end{cases} \rightarrow \begin{cases} v_n^2 = v_n'^2 + Av_B^2, \\ v_n = v'_n + Av_B \end{cases} \rightarrow \begin{cases} v_n^2 - v_n'^2 = Av_B^2, \\ v_n - v'_n = Av_B \end{cases}$$

разделим первое уравнение на второе почленно, и составим новую систему: из двух уравнений — 1-го, полученного в результате нашего деления, и 2-го закона сохранения импульса:

$$\begin{cases} v_n + v'_n = v_{я'} \\ v_n - v'_n = Av_{я'} \end{cases} \quad \text{отсюда } v_{я'} = \frac{2v_n}{(1+A)}$$

Энергия, потерянная нейтроном, равна энергии, приобретенной ядром, т. е.

$$\Delta K_n = K_{я'} = \frac{Av_{я'}^2}{2} = \frac{2Av_n^2}{(1+A)^2} = \frac{4AK_n}{(1+A)^2},$$

и  $\Delta K_n/K_n = 4A/(1+A)^2$ . Это — максимальная потеря энергии. Минимальная происходит при скользком ударе и  $\Delta K_n = 0$ . Средняя (относительная) потеря энергии составляет

$$\left( \frac{\Delta K_n}{K_n} \right)_{\text{ср}} = \frac{2A}{(1+A)^2}.$$

Теперь мы можем проверить числа, приведенные в тексте. Для ядра с  $A = 100$  (например, изотоп рутений-100)

$$\left( \frac{\Delta K_n}{K_n} \right)_{\text{ср}} \approx \frac{2A}{A^2} = \frac{2}{A} = 2\%.$$

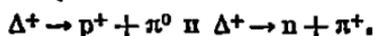
Для протона  $A = 1$  и

$$\left( \frac{\Delta K_n}{K_n} \right)_{\text{ср}} = 1/2 = 50\%.$$

Если при каждом соударении в водородосодержащем веществе нейтрон, в среднем, теряет половину своей энергии, то после 25 соударений частица с первоначальной энергией в 1 МэВ будет иметь энергию

$$K \approx \frac{10^6 \text{ эВ}}{2^{25}} \approx 0,025 \text{ эВ}.$$

23. Барийонный заряд  $\Delta$ -резонанса должен быть равен 1. Возможные реакции



24. Полное количество энергии, которое потребуется для нагревания озера,

$$Q = Mc_n (t_2 - t_1),$$

где  $M$  — масса воды,  $c_n$  — теплоемкость,  $t_2 = 100^\circ \text{C}$ ,  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ . Если считать, что при аннигиляции энергия покоя протона и антипротона целиком идет на нагревание воды (к.п.д. = 100%), то

выделяемая на одну пару энергия  $q = 2m_p c^2$ . Отсюда

$$n = \frac{M c_D (t_2 - t_1)}{2m_p c^2} \approx 2 \cdot 10^{21} \text{ антинуклонов}$$

или  $3 \cdot 10^{-6}$  кг антивещества и  $3 \cdot 10^{-6}$  кг вещества.

25. Распад  $\pi^0$ -мезона на два гамма-кванта происходит под действием электромагнитного взаимодействия, ведь продукты распада — кванты электромагнитного поля. Он идет с  $\tau = 10^{-16}$  с. Мюон и нейтрино появляются в процессе распада  $\pi^\pm$ -мезона под действием слабого взаимодействия. Время жизни  $\pi^\pm$ -мезонов равно  $3 \cdot 10^{-8}$  с. Очевидно, что электромагнитное взаимодействие, которое в десятки миллионов раз «быстрее» слабого, гораздо «сильнее» последнего.

26. Для решения этой задачи воспользуемся формулами теории относительности:

$$E_\nu = \frac{m_\nu c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}; \text{ отсюда } \frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{m_\nu^2 c^4}{E^2}}$$

Поскольку  $m_\nu^2 c^4 / E \ll 1$ , можно воспользоваться приближенной формулой \*)

$$v/c = 1 - \frac{1}{2} (m_\nu^2 c^4 / E^2),$$

где  $m_\nu c^2 = 0,1 \cdot 0,511 \text{ МэВ} = 0,05 \text{ МэВ}$ ,  $v/c = 0,99875$ .

27. Как предсказал Паули, при каждом  $\beta$ -распаде вылетает один электрон и одно нейтрино. Их количества всегда одинаковы.

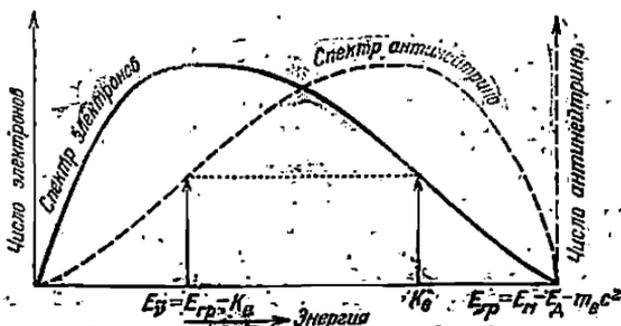


Рис. 36.

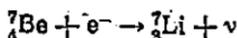
На кинетическую энергию частиц, продуктов реакции (считаем, что масса нейтрино очень мала), идет энергия  $E_M = E_\pi - m_e c^2$ , где  $E_M$  —

\*) Пусть  $x \ll 1$ . Тогда  $\sqrt{1 - x^2} \approx 1 - \frac{1}{2}x^2$ . Добавим к подкоренному выражению член  $\frac{1}{4}x^4$ , который совсем уже мал по сравнению с 1. Тогда

$$\sqrt{1 - x + \frac{1}{4}x^2} = \sqrt{(1 - \frac{1}{2}x)^2} = 1 - \frac{1}{2}x.$$

энергия материнского ядра,  $E_d$  — дочернего и  $m_e c^2$  — энергия покоя электрона. Это — постоянная для данного распада величина, которую мы назвали  $E_{гр}$ . Тогда  $K_e + E_\nu = E_{гр}$ ,  $K_e$  — кинетическая энергия электрона. Таким образом, спектр энергий нейтрино получается вычитанием спектра энергий электронов из постоянной величины  $E_{гр}$  и выглядит так, как это показано на рис. 36.

28. Запишем сначала уравнение этой реакции



и воспользуемся законами сохранения энергии и импульса  $E_0 = E_d + E_\nu$ ,  $p_\nu = p_d$  или

$$E_0 = \frac{p_d^2}{2M} + p_d c, \quad p_\nu = p_d$$

(так как выделяющаяся энергия несравненно меньше массы ядра, то для последнего можно использовать формулы классической механики). Отсюда  $E_0 = p_d^2/2M + p_d c$  или

$$E_0 = \frac{p_d^2 c^2}{2M c^2} + p_d c = p_d c \left( \frac{p_d c}{2M c^2} + 1 \right),$$

$$p_d c = M v_d c \ll 2M c^2,$$

поэтому с очень хорошей точностью можно положить  $E_0 = p_d c$  и тогда

$$E_d = \frac{E_0^2}{2M c^2} = \frac{(0,864)^2}{2 \cdot 7 \cdot 936} \approx 57,3 \text{ эВ}.$$

Такая энергия (с точностью до энергетического разрешения) и была зарегистрирована Алленом, что явилось еще одним косвенным доказательством существования нейтрино.

29. Обратимся к рис. 37. Свет, который излучен в точке  $P$  равномерно расходится по всем направлениям, можно условно разбить на две части. Лучи, не попавшие в конус с углом раствора  $\alpha$  ( $\alpha$  — угол полного внутреннего отражения), останутся в пластине и после нескольких отражений от верхней и нижней граней придут к ее торцам. Фотоны, летящие внутри конуса, частично выходят из пластины (преломленный луч) и при каждом следующем отражении их число, оставшееся в пластине, уменьшается. В конце концов все они окажутся вне пластины. Оценим долю света (обозначим ее  $b$ ), распространяющуюся внутри конуса:  $b = S_{сф}/S$ , где  $S_{сф}$  — часть поверхности сферы радиуса  $R$ , вырезаемая конусом,  $S$  — полная поверхность сферы, равная  $4\pi R^2$ . Для оценки можно заменить

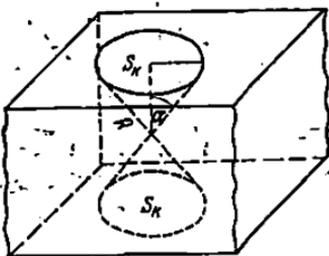


Рис. 37.

$S_{\text{сф}} \approx 2S_R$ , тогда

$$b \approx \frac{2\pi R^2 \sin^2 \alpha}{4\pi R^2} = \frac{\sin^2 \alpha}{2},$$

из условия полного внутреннего отражения

$$\sin \alpha = 1/n \text{ и } b = 1/2n^2 = 0,2.$$

Внутри пластины останется часть света, равная  $1 - b = 0,8$  полной интенсивности вспышки.

30. Старания сконструировать такой светопровод не могут привести к успеху. Наибольшее число фотонов, которое можно собрать — 25, т. е. плотность потока света (число фотонов на  $1 \text{ м}^2$ ) на фотокатод не может превышать плотность потока, падающего из окна кристалла. Это есть следствие второго начала термодинамики. В противном случае, освещая такой светопровод, мы получили бы на его выходной грани большую температуру, чем на входной, и соединив их термодинамической парой, получали бы энергию от единственного источника, не совершая никакой работы.

$$31. u = \frac{q}{c} = \frac{e \cdot 0,15 \cdot \text{фс}^{12}}{c} \approx 0,01 \text{В.}$$

32. Для объяснения надо вспомнить, что космическое излучение состоит из разных компонент. Сначала кривая резко падает — поглощается мягкая компонента, состоящая из электронов и фотонов. Когда эта часть излучения практически поглотилась, что произошло при толщине в  $10 + 15 \text{ см}$  свинца, защита перестает столь эффективно работать. Для ослабления ядерной компоненты требуются уже десятки сантиметров свинца.

33. Этот вопрос возник на одной из лекций, когда учащиеся стали перечислять свойства нейтрино, казалось бы, совершенно не объяснимые с точки зрения классических представлений. (Это те представления, к которым мы просто привыкли в силу «классической» методики обучения.) Среди перечисленных свойств было, например, существование спина. Собственный момент импульса нейтрино равен, как и у электрона,  $1/2\hbar$ . Если у электрона его трудно себе представить, то уж у частицы, не имеющей массы, по словам учащихся, совершенно невозможно.

Может быть, читатель сам продолжит список таких свойств?

34. Половий следовал за висмутом, а радий — за барием.

35. Кинетическая энергия всех частиц, кроме нейтрино, превращается в тепло. Таким образом, поток нейтрино на поверхности Земли

$$i = \frac{2W}{Q \cdot 4\pi R^2} \approx 8,8 \cdot 10^{10} \text{ нейтрино}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}).$$

36. В двух первых из перечисленных процессов испускается нейтрино, в последнем — антинейтрино.

37. Приведем это количество в литрах газообразного водорода при нормальных условиях. Получится около одного миллиона литров.

38. Если считать, что при каждом соударении электрон теряет всю дополнительную энергию, которую он приобрел за время свободного движения  $t$  в электрическом поле, то средняя скорость дрейфа

составит  $u = \frac{1}{2} at$ , где  $a$  — ускорение движения в поле  $E$  одновалентного иона с массой  $M$ :

$$a = \frac{eE}{M}, \text{ и } u = \frac{eEt}{2M}.$$

Поскольку  $t = 1/n$ , то  $u = eE/2Mn \approx 17$  м/с, что значительно меньше, чем скорость теплового движения ионов при нормальных условиях (покажите самостоятельно).

39. Под действием электрического поля в камере ионы движутся во много раз медленнее, чем электроны. Поэтому нарастание импульса в течение первого промежутка времени  $0 \rightarrow t_1$  обусловлено приходом на анод электронов. После того как все они достигнут анода, нарастание станет определяться скоростью дрейфа ионов ( $t_1 + t_2$ ). Поскольку величина напряжения за это время не уменьшилась, так как заряженный конденсатор — ионизационная камера — не успевает разрядиться, это означает, что  $R$  достаточно велико.

40. При распаде аргона-37 траектория образовавшегося электрона представляет собой точку. Для гамма-кванта, оставшегося в счетчике энергию в виде двух комптоновских электронов с  $K_e = 1,4$  КэВ каждый (фон), траектория — две точки. Если эти две точки находятся на одинаковом расстоянии от пипы счетчика, то разделить импульсы от эффекта и фона по форме их нарастания нельзя. Ведь заряды от двух точек придут к пипе одновременно. В общем случае, если траектория фоновой частицы представляет собой несколько ионов, лежащих на прямой, разделение может быть выполнено только в том случае, если эта прямая не параллельна пипе счетчика.

41. 1. Более полумиллиона километров. 2.  $4 \cdot 10^3$  оборотов. 3. В 75 раз.

42. Используя уравнение  $E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$  и представив  $\frac{v}{c} = 1 - \left(\frac{m_0 c^2}{E}\right)^2 \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{m_0 c^2}{E}\right)^2$  (см. решение задачи 25), получим, что для  $\pi^-$ -мезона отлечение составляет  $6 \cdot 10^{-4}\%$ , для  $K^-$ -мезона  $8 \cdot 10^{-3}\%$ .

43. Если в начале измерений было  $N_0$  радиоактивных атомов, а в конце осталось  $N = N_0 e^{-t/\tau}$ , то за это время распалось

$$n_{\text{ат}} = N_0 - N_0 e^{-t/\tau} = N_0 (1 - e^{-t/\tau}),$$

так как 1 месяц  $\ll 2,8 \cdot 10^{20}$  лет, то

$$n = N_0 \frac{t}{\tau} = 1,4 \cdot 10^{23} \cdot \frac{1}{12 \cdot 2,8 \cdot 10^{20}} = 42.$$

44.  $2 \cdot 10^{-13}$  см<sup>3</sup>.

45. В результате упругого соударения нейтрон может передать протону энергию от нулевой до полной. Этому соответствуют различные углы, под которыми сталкиваются частицы. Поскольку любой угол равновероятен, то и любая передача энергии — равновероятна. Распределение амплитуд импульсов будет непрерывным от 0 до  $A_{\text{макс}}$ .

46. 1. В пузырьковой камере гораздо большее количество вещества. Быстрая частица тормозится в нем, достигается большая кривизна трека в магнитном поле, точнее измеряется импульс.

2. Так как жидкость практически несжимаема, то сброс давления в пузырьковой камере осуществляется весьма малым перемещением поршня. Для камеры Вильсона такое перемещение на несколько порядков больше. Поэтому быстрота подготовки к работе у пузырьковой камеры выше. И за единицу времени на ней можно сделать в десятки раз больше снимков.

3. Это следы протонов отдачи,

Таблица свойств  
некоторых элементарных частиц

Класс	Символ частицы	Масса покой, МэВ	Спин в еди- ницах $\hbar$	Время жизни, с	Виды распада
Фотон	$\gamma$	0	1	Стабилен	
Лептоны	$\nu_e, \bar{\nu}_e$ $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	0 0	1/2 1/2	Стабильны	
	$e^-, e^+$	0,511	1/2	Стабильны	
	$\mu^-, \mu^+$	105,66	1/2	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
Мезоны	$\pi^-, \pi^+$	139,57	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
	$\pi^0$	134,96	0	$0,8 \cdot 10^{-26}$	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$
	$K^-, K^+$	493,7	0	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ $K^- \rightarrow \mu^- + \pi^0$
Барionsы	$p, \bar{p}$	938,28	1/2	Стабильны	
	$n, \bar{n}$	939,57	1/2	15 мин	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

*Александр Александрович Еоровой*  
**КАК РЕГИСТРИРУЮТ ЧАСТИЦЫ  
ПО СЛЕДАМ НЕЙТРИНО**

---

(Серия: Библиотечка «Квант»)

Редактор *Л. П. Русакова*  
Техн. редактор *Е. В. Морозова*  
Корректор *Е. Я. Стрелова*

ИБ № 12099

Сдано в набор 22.06.81. Подписано к печати 19.10.81. Т-27727.  
Формат 84×108<sup>1/8</sup>, бумага тип. № 1. Обыкновенная гарнитура.  
Высокая печать. Условн. печ. л. 0,24 Уч.-изд. л. 9,53. Тираж 150 000 экз.  
(1-й завод 1—75000 экз.)  
Заказ № 586. Цена 30 коп.

Издательство «Наука»  
Главная редакция физико-математической литературы  
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

2-я типография изд-ва «Наука», Москва, Шубинский пер., 10