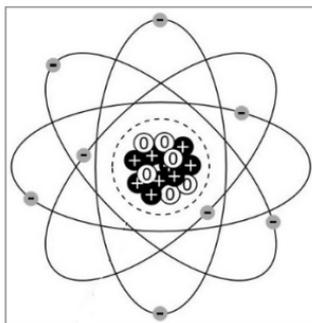


Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

В. В. Федоров

ИСТОРИЯ И РАЗВИТИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СТРОЕНИИ ОКРУЖАЮЩЕГО МИРА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ АСПИРАНТОВ



Гатчина
2021

Федоров Валерий Васильевич – доктор физико-математических наук,
профессор.

*Печатается по решению Ученого совета Института
(протокол заседания от 19.12.2019 № 9).*

Федоров В. В. История и развитие физических представлений о строении окружающего мира. – Гатчина Ленинградской обл.: Изд-во НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2021. – 296 с.

Данное пособие написано на основе лекций, прочитанных автором в разное время школьникам старших классов, студентам младших и старших курсов в СПбГУПТД, СПбГУ, СПбПУ, аспирантам НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, а также на ежегодных Зимних школах ПИЯФ.

Изложена история эволюции представлений о строении вещества от древних и до наших дней, рассмотрены вопросы развития представлений о симметриях нашего мира и их связи с законами сохранения. Обсуждаются наиболее важные эксперименты, проведенные с начала XIX в., и цепочка открытий, приведшая к современной Стандартной модели элементарных частиц и их взаимодействий, а также развитие квантовых представлений в микромире и развитие представлений о строении Вселенной в макромире. Затронуты задачи, решаемые в нейтронной физике, физике высоких энергий, вопросы ядерной и термоядерной энергетики.

В одной из глав частично использован материал лекций В. Ф. Ежова, прочитанных им в Самарском университете. Автор выражает ему глубокую благодарность за предоставление материала.

Автор также очень признателен И. В. Манинен и дружному коллективу издательско-полиграфического отдела за помощь в подготовке рукописи к печати.

Пособие предназначено для студентов и аспирантов, специализирующихся в области физики ядра и элементарных частиц, а также может быть полезно для учителей физики средней школы и школьников старших классов.

Часть 1. ОКРУЖАЮЩИЙ НАС МИР

Физика – наука, которая занимается изучением окружающего нас мира, то есть выявляет закономерности, по которым происходят различные события в природе, и устанавливает между ними связь. В результате появляется возможность предсказывать определенные явления природы, моделировать их, а также вызывать аналогичные явления искусственно, следовательно, и управлять ими.

С древности люди пытались защитить себя от опасных проявлений окружающей среды, от всякого рода стихийных бедствий: пожаров, ураганов, засухи, наводнений и т. п. Для этой цели нужно было попытаться понять причины, то есть суть происходящего. Самое простое объяснение каждого явления было в обожествлении его причины (бог огня вызывает огонь, бог Солнца отвечает за его восход и заход, бог грома управляет громом и молнией и т. д.). Поэтому люди видели способ защиты от природных катаклизмов в обращениях и жертвоприношениях соответствующему богу.

Человечеству понадобилось несколько тысячелетий развития, поисков, напряженной работы мысли, упорного труда, совершения на этом пути множества открытий, изобретений и ошибок, чтобы постепенно понять, что природой управляет не такое уж большое число законов и их можно выявить и, более того, успешно использовать для собственного блага в многовековой борьбе за существование.

1. Строение вещества

1.1. Атомная гипотеза

Одними из главных вопросов, которые занимали людей на протяжении всего пути развития, были следующие: из чего же все состоит и до какой степени мы можем дробить вещество? Есть ли предел делимости вещества?

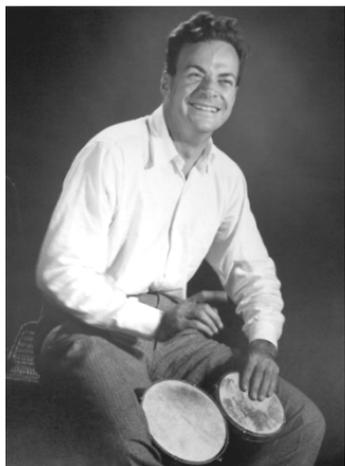
Ричард Фейнман – выдающийся ученый нашего времени – в своих знаменитых фейнмановских лекциях по физике высказал мнение, что главным достижением человеческой мысли за все время существования человечества можно считать установление факта, что все вещество состоит из атомов. Вот его слова: «Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались бы уничтоженными и к грядущим

поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это – *атомная гипотеза...*»

Экспериментально она была доказана только в начале XX в., хотя гипотезу об атомном строении вещества выдвигали еще древние греки (Демокрит, ок. 460–370 гг. до н. э.).

Атомную гипотезу (являющуюся в наше время твердо установленным фактом) можно сформулировать так: «Все тела состоят из атомов (маленьких частиц вещества), которые находятся в непрерывном движении, притягиваются между собой на небольшом расстоянии и отталкиваются, если их прижать еще плотнее друг к другу». Эта гипотеза позволила объяснить все свойства газов, жидкостей и твердых тел, а также процессы, которые с ними происходят: от плавления и испарения, конденсации и кристаллизации до химических реакций.

Атомы считались до начала XX столетия неделимыми кирпичиками вещества, пока французский физик Антуан Беккерель (1852–1908) не обнаружил в 1896 г. явление радиоактивности урана, то есть распад атомов одного элемента и превращение их в атомы другого элемента.



Ричард Филлипс Фейнман (*Richard Phillips Feynman*; 1918–1988) – выдающийся американский физик. Один из основателей квантовой электродинамики, создатель новых методов в квантовой механике и физике элементарных частиц. В 1943–1945 гг. входил в число разработчиков атомной бомбы в Лос-Аламосе. Лауреат Нобелевской премии по физике 1965 г. Интереснейший, остроумный человек со сложной судьбой.

1.2. Строение атома

В 1897 г. англичанин Дж. Дж. Томсон (1856–1940) открыл первую элементарную частицу – отрицательно заряженный *электрон*, а в 1903 г. предложил первую составную модель атома, согласно которой атом представлял собой положительно заряженный шарик (каплю) с вкрапленными в него электронами, так, чтобы его суммарный заряд равнялся нулю.

В 1911 г. Эрнест Резерфорд (1871–1937) выяснил, что атомы состоят из маленького *положительного тяжелого ядра*, а вокруг него на большом расстоянии находятся легкие отрицательно заряженные электроны. В результате возникла так называемая планетарная модель атома, по аналогии с Солнечной системой, в которой легкие планеты обращаются по орбитам вокруг массивного Солнца.

1.3. Структура ядра

Далее опыты того же Резерфорда 1919-го и 20-х гг. прошлого века показали, что ядра атомов содержат *протоны* (положительно заряженные частицы). В 1932 г. английским физиком Джеймсом Чедвиком (1891–1974) был открыт *нейтрон*. Советский ученый Д. Д. Иваненко (1904–1994), а затем и немецкий физик Вернер Гейзенберг (1901–1976) высказали гипотезу, что **ядра атомов состоят из нейтронов и протонов**, которые также притягиваются на гораздо более малых, чем размер атома, «ядерных» расстояниях и отталкиваются, если их сблизить еще больше. Гипотеза о таком строении ядра оказалась правильной.

Таким образом, к 1932 г. были открыты все «элементарные» частицы, из которых состоит обычное вещество: протон, нейтрон, электрон. Кроме того, был известен фотон (гамма-квант) – частица электромагнитного излучения (света). И с этого времени стали обнаруживаться все новые и новые частицы. В 1932 г. был открыт *позитрон* – *частица антиматерии*, полный аналог электрона, только положительно заряженный. В 1936 г. в космических лучах были обнаружены так называемые мюоны – положительно и отрицательно заряженные частицы, аналогичные позитрону и электрону, но с массой, приблизительно в 208 раз больше массы электрона. В 1947 г. (также в космических лучах) была открыта новая пара заряженных частиц, названных π -мезонами. На ускорителе заряженных частиц (протонов) в 1955 г. был обнаружен *антипротон*, затем *антинейтрон*. Сейчас уже получены атомы *антиводорода* (то есть *антивещество*).

Далее новые частицы посыпались как из рога изобилия. Всего их было открыто около 700 вместе с античастицами. Появилась гипотеза, что «все состоит из всего», то есть каждая «элементарная» частица «состоит» из всех

«элементарных» частиц, поскольку при столкновениях, например, двух частиц высокой энергии рождалось множество частиц разного сорта, число которых и массы определялись энергией сталкивающихся частиц. Тем самым опять встал вопрос об их истинной элементарности.

1.4. Стандартная модель элементарных частиц

Однако оказалось (1972), что протоны, в свою очередь, состоят из более мелких объектов, размер которых даже современная техника не позволяет измерить, то есть «точечных» объектов – **партонов**, которые сейчас отождествлены с *кварками*. В результате неделимыми кирпичиками современного мира являются так называемые **кварки** и **лептоны**, которые взаимодействуют между собой посредством обмена другими частицами: **глюонами** (*сильное взаимодействие*), **фотонами**, **W- и Z-бозонами** (*электромагнитное и слабое взаимодействия*) и **гравитонами** (*гравитационное взаимодействие*). Современные представления о структуре элементарных частиц и их взаимодействий отражаются в так называемой *Стандартной модели* (см. рис. 1.1). Под взаимодействием мы понимаем не только притяжение или отталкивание частиц друг от друга, но также взаимопревращения частиц. Например, в результате слабого взаимодействия происходит распад нейтрона на протон, электрон и антинейтрино. Если выразиться точнее, то все частицы (и взаимодействия между ними) могут быть построены из трех поколений кварков и лептонов (*фермионов* – частиц с полуцелыми спинами) и переносчиков взаимодействий (*бозонов* – частиц с целыми спинами). Стандартная модель содержит: *квантовую хромодинамику*, описывающую сильные взаимодействия кварков посредством обмена глюонами, и *теорию электрослабых взаимодействий* между кварками, кварками и лептонами, а также между лептонами путем обмена фотонами, W- и Z-бозонами (эта теория объединяет *квантовую электродинамику* и *теорию слабых взаимодействий*).

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ

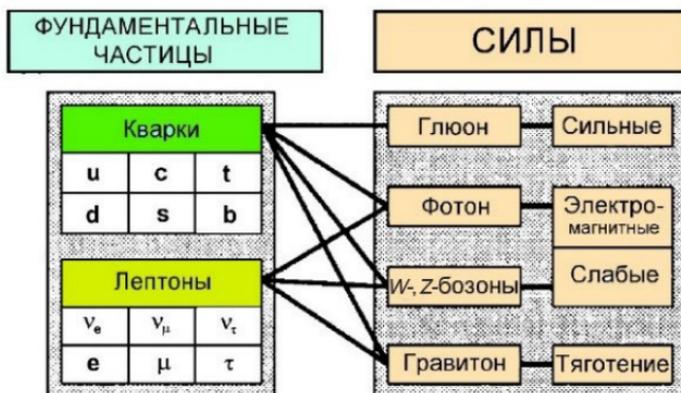


Рис. 1.1. Стандартная модель элементарных частиц и их взаимодействий. Три поколения кварков и лептонов (фермионов – частиц с полуцелыми спинами) и переносчики взаимодействий (бозоны – частицы с целыми спинами). Кварки участвуют во всех известных взаимодействиях: сильном (глюоны), электромагнитном (фотоны), слабом (W- и Z-бозоны) и гравитационном (гравитоны). Лептоны не участвуют в сильном взаимодействии

Более детальная таблица субэлементарных частиц выглядит следующим образом (табл. 1.1): по вертикали отложены четыре семейства элементарных частиц (кварков и лептонов), а по горизонтали – три их поколения.

Таблица 1.1

Таблица субэлементарных частиц*

Семейство (family)	Поколение (generation)			q	B
	1	2	3		
Лептоны 1 (leptons) 2	ν_e e^-	ν_μ μ^-	ν_τ τ^-	0 -1	0 0
Кварки 3 (quarks) 4	u d	c s	t b	+2/3 -1/3	+1/3 +1/3

* В двух последних столбцах приведены электрический (q) и так называемый барионный (B) заряды частиц. Барионный заряд введен, для того чтобы отличать кварки и антикварки, а также частицы и античастицы, из них образованные, то есть мир и антимир. Существует и так называемый лептонный заряд.

В первое поколение элементарных частиц входят так называемые *u*- и *d*-кварки (*up* и *down*, раньше они назывались протонными и нейтронными соответственно, поскольку именно из трех таких кварков состоят протон – *uud* и нейтрон – *udd*), а также электрон и электронное нейтрино. *Нейтрино* – это такая частица, которая не имеет ни массы, ни заряда и, в отличие от фотона, участвует только в так называемых слабых взаимодействиях.

Насколько это взаимодействие слабое, можно представить себе из следующего примера. Если заполнить обычным веществом все пространство от Земли до Солнца (приблизительно 150 млн км), то при движении нейтрино на таком расстоянии может произойти всего лишь одно столкновение, в результате которого нейтрино либо поглотится веществом, либо изменит направление своего движения. Таким образом, вся эта гигантская масса вещества для нейтрино практически невидима и является совершенно прозрачной.

Фотон же, например, поглощается очень тонким слоем сетчатки глаза. Это происходит в результате электромагнитного взаимодействия, и именно этому взаимодействию мы обязаны своим зрением.

В настоящее время имеются созданные руками человека детекторы, которые позволяют «видеть» нейтринное излучение, например, от Солнца, ускорителя или ядерного реактора.

Из частиц первого поколения образованы стабильные частицы: протон, а также нейтрон, который в свободном состоянии живет около 900 с, распадаясь на протон, электрон и антинейтрино, но является стабильным в ядрах атомов. Электрон и нейтрино также стабильны. Из этих частиц и создан окружающий нас мир.

Все частицы, образованные следующими поколениями, живут очень мало, от нескольких миллионных долей секунды (время жизни мюона 2,2 мкс) до 10^{-25} с (время жизни самого тяжелого *t*-кварка). Все они распадаются, в конце концов, на стабильные частицы. Кварки второго поколения – *c* (открыт в 1974 г.) и *s* называются очарованным (от английского слова *charm*) и странным (*strange*) соответственно. Странный кварк был фактически открыт в 1953 г., когда в реакциях с элементарными частицами обнаружили закон сохранения некоторого числа, которое назвали странностью. Оказалось, что это число странных кварков, входящих в состав некоторых элементарных частиц.

Лептоны этого поколения – *мюон* и *мюонное нейтрино*. Мюон за время 2,2 мкс распадается на мюонное нейтрино, электрон и *электронное антинейтрино*.

Кварки верхнего и нижнего семейств третьего поколения – *t*-кварк и *b*-кварк (от английских слов *top* и *bottom*, которые в переводе означают «верх» и «низ», или «крышка» и «дно» соответственно) – имеют еще одно название: *true* (настоящий кварк) и *beauty* (прекрасный кварк, открыт

в 1981 г.). Самый тяжелый из всех кварков и известных в настоящее время элементарных частиц – *t*-кварк (открыт лишь в 1995 г., его масса в 184 раза превосходит массу протона (ядра атома водорода), то есть весит столько же, сколько ядро атома вольфрама). Для прямого обнаружения частиц с такой или большей массой нужны коллайдеры (или суперколлайдеры), то есть такие ускорители, в которых частицы разгоняются навстречу друг другу до огромных энергий – таких, чтобы при столкновении могла родиться частица с соответствующей массой.

Лептоны этого поколения – *τ-лептон* (тау-лептон) и *τ-нейтрино* (тау-нейтрино) – открыты в 1975 г. Тау-лептон имеет массу приблизительно 1,9 массы протона, тогда как масса электрона в 1 840 раз меньше массы протона. Мюон же, как мы говорили, в 208 раз тяжелее электрона. Таким образом, налицо, как сейчас говорят, *иерархия масс*: частицы каждого последующего поколения существенно тяжелее частиц предыдущего.

1.5. Масштабы расстояний в субатомном мире

Каковы же масштабы размеров этих частиц? **Размер атома** составляет около 10^{-8} см. Как можно представить себе такой размер? Возьмем капельку воды, например диаметром в 1 мм, и увеличим ее в 10 000 раз, получим каплю уже диаметром в 10 м. При этом частички примесей размерами в 1 мк превратятся в шары размерами в 1 см, эти частички будут непрерывно дрожать, хаотически передвигаться. Это так называемое броуновское движение, которое возникает из-за того, что в них непрерывно стучаются сотни атомов с разных сторон. Причем, поскольку частички маленькие, с разных сторон в них попадает разное количество атомов, поэтому они и будут хаотически перемещаться в разные стороны. Если частица большая, то число ударяющих атомов будет настолько большим, что разница ударов с разных сторон будет для такой тяжелой частицы незначительна, и броуновское движение будет незаметно. Наблюдение броуновского движения и явилось первым непосредственным наблюдением движения атомов. Если теперь каплю увеличить еще в 10 000 раз, то есть она станет величиной в 100 км (в 10 раз больше самой высокой на Земле горы), то мы увидим молекулу воды, которая состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода, с размерами около 1 см. Величина характерного размера атома 10^{-8} см имеет собственное название – ангстрем (Å):

$$1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см.}$$

Атом, оказалось, состоит из **ядра, размер которого** около 10^{-12} см (для достаточно тяжелых атомов), то есть еще в 10 000 раз меньше. Что это означает? А то, что если мы увеличим нашу картинку еще в 10 000 раз, то наш атом величиной в 1 см превратится в 100-метровый объект, практически

пустой, и только в его центре будет находиться ядро размерами в 1 см (рис. 1.2), в котором сосредоточена практически вся масса атома, поскольку электроны приблизительно в 1 800 раз легче протонов (в почти двух килограммах вещества на долю электронов приходится всего грамм). Они образуют почти невесомое облако вокруг ядра атома.

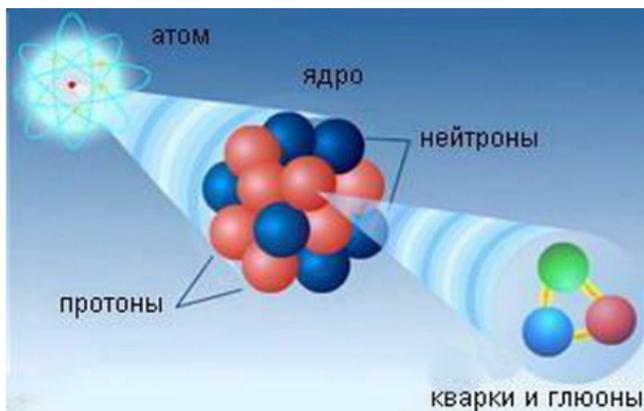


Рис. 1.2. Вглубь атома. Весьма упрощенная картинка современного представления субатомного мира

Следовательно, все вокруг нас, и все мы в том числе, состоим практически из пустоты. Атомы не могут сближаться более чем на 10^{-8} см (размер электронного облака), так как это им запрещают законы квантовой механики. Само же ядро состоит, в свою очередь, из **нуклонов (протонов и нейтронов), размер которых $\sim 10^{-13}$ см** (под знаком « \sim » мы будем понимать: «приблизительно равно», «равно по порядку величины»).

Эта величина тоже имеет свое название – ферми (Фм):

$$1 \text{ Фм} = 10^{-13} \text{ см.}$$

Возникает вопрос: а что получится, если образовать «ядерное» вещество, то есть сбросить все электроны и прижать ядра друг к другу? Какова будет плотность такого вещества? Мы знаем, что у воды плотность 1 г/см^3 . Одна из самых больших плотностей у урана – 19 г/см^3 (у осмия – $22,6 \text{ г/см}^3$, у платино-иридиевого сплава – $21,62 \text{ г/см}^3$). Если сбросить электроны, то радиус каждого атома R уменьшится от 10^{-8} см до 10^{-12} см, то есть в 10^4 раз. А поскольку объем V пропорционален R^3 ($V = 4\pi R^3/3$), то он уменьшится в 10^{12} раз, следовательно, плотность увеличится в 10^{12} раз и будет составлять $10^{12} - 10^{13} \text{ г/см}^3$, то есть 1–10 млн тонн на см^3 . Такова плотность ядерного вещества в ядрах всех атомов. Кроме того, существуют так называемые

нейтронные звезды, которые состоят из одних нейтронов, вещество этих звезд имеет даже более высокую плотность из-за гравитационного сжатия.

Нуклоны состоят, в свою очередь, из кварков, размер которых, по крайней мере, еще на 4 порядка (то есть в 10 000 раз) меньше размера нуклона: $R_q < 10^{-17}$ см. Это предел точности измерения размеров объекта. Еще более плотное вещество, которое получается при столкновениях ядер с громадными энергиями, называется кварк-глюонной плазмой. Такое вещество существовало на ранних стадиях образования Вселенной, когда она была настолько горячей и плотной, что нуклоны не могли существовать как частицы. При такой температуре (кинетической энергии) они разваливались в результате столкновений на кварки и глюоны.

Итак, мы достигли с вами предела, до которого на сегодня простираются наши знания о малых расстояниях, то есть о наиболее мелкой структуре вещества.

2. Вселенная

2.1. Материя во Вселенной

Каковы же наши знания о Вселенной, которая также состоит из атомов и чего-то еще, о чем мы можем пока только догадываться? Из астрономических наблюдений мы заключаем, что величина порядка 10^{28} см, или 10^{10} (10 млрд) световых лет, – это некая характерная длина, которую иногда называют радиусом Вселенной (световой год – это такое расстояние, которое свет проходит за 1 год). Расстояние от Земли до Солнца – $1,5 \cdot 10^{13}$ см (150 млн км), или около 8 световых минут. Оно используется в качестве астрономической единицы (1 а. е. = $1,5 \cdot 10^{13}$ см). Радиус Земли – $6,4 \cdot 10^8$ см (6 400 км).

Исходя из средней плотности видимой части Вселенной можно заключить, что число протонов и нейтронов в ней $\sim 10^{80}$ (с неточностью раз в 100). В состав Солнца входит $\sim 10^{57}$ протонов и нейтронов, Земли – $\sim 4 \cdot 10^{51}$, то есть почти в миллион раз меньше. Самая большая планета Солнечной системы Юпитер обладает массой в 318 масс Земли, что в 2,5 раза массивнее всех остальных планет, вместе взятых. Значит, наша планетная система состоит в основном из Солнца. В нем сосредоточена подавляющая часть всей массы системы (около 99,866 %).

Число нуклонов во Вселенной достаточно, чтобы образовать $10^{80}/10^{57} = 10^{23}$ звезд типа Солнца (то есть приблизительно столько же, сколько атомов в 1 см^3). В настоящее время известно, что значительная часть Вселенной состоит из звезд с массами от 0,01 до 100 солнечных масс и облаков газа. Исходя из данных наблюдений видимой в различных диапазонах

части Вселенной можно оценить ее массу. Однако здесь имеется тайна, которую пока не удалось разгадать. **Массу Вселенной** можно также оценить по тяготению, то есть по ее влиянию на движение звезд. И оказалось, что эта масса в 20 раз превосходит массу видимых звезд. То есть 95 % массы Вселенной невидимо. И так, доля обычного вещества (протонов, атомных ядер, электронов) в суммарной энергии современной Вселенной составляет всего 5 %.

2.2. Реликтовые фотоны

Помимо обычного вещества на каждый кубический сантиметр пространства Вселенной приходится ~ 500 квантов излучения, а полное число фотонов в пределах видимой Вселенной в несколько миллиардов раз больше полного числа частиц вещества, то есть атомов, ядер, электронов, из которых состоят планеты, звезды и галактики. Это общее фоновое излучение Вселенной называют, с легкой руки И. С. Шкловского, реликтовым, то есть остаточным, представляющим собой остаток, реликт, плотного и горячего начального состояния Вселенной. Несмотря на значительное преобладание по числу частиц, реликтовое излучение уступает звездам и галактикам по вкладу в общую массу Вселенной. В современную эпоху плотность излучения составляет $3 \cdot 10^{-34}$ г/см³, что в ~ 1 000 раз меньше усредненной плотности вещества галактик.

2.3. Реликтовые нейтрино

Кроме того, во Вселенной имеются и реликтовые нейтрино – ~ 300 нейтрино всех типов в 1 см³. Их вклад в полную энергию (массу) во Вселенной невелик, поскольку массы нейтрино малы, и составляет заведомо не более 3 %. Оставшиеся 90–95 % полной энергии во Вселенной – «неизвестно что». Более того, это «неизвестно что» состоит из двух фракций: темной материи и темной энергии, как изображено на рис. 1.3.

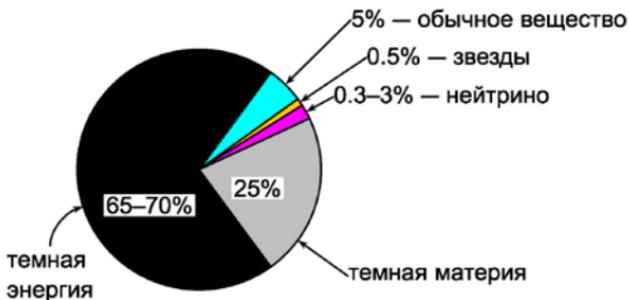


Рис. 1.3. Распределение материи во Вселенной: 95 % массы Вселенной невидимо, доля обычного вещества (протонов, атомных ядер, электронов) в суммарной энергии современной Вселенной составляет 5 %. Из нее на долю звезд приходится всего 10 %. Обычное вещество находится в основном в облаках газа

2.4. Темная материя

Темная материя сродни обычному веществу в том смысле, что она способна собираться в сгустки (размером, скажем, с галактику или скопление галактик) и участвует в гравитационных взаимодействиях так же, как обычное вещество. Скорее всего, она состоит из новых, не открытых еще в земных условиях частиц.

2.4.1. Наблюдательные данные по галактикам

Темная материя имеется и в галактиках. О ее наличии можно, например, судить по скоростям вращения звезд и газовых облаков вокруг центров галактик. Чем сильнее гравитационное поле, тем быстрее вращаются вокруг галактики звезды и облака газа, так что измерения скоростей вращения в зависимости от расстояния до центра галактики позволяют восстановить распределение массы в ней. Это проиллюстрировано на рис. 1.4: по мере удаления от центра галактики скорости обращения не уменьшаются, что говорит о том, что в галактике, в том числе вдалеке от ее светящейся части, имеется несветящаяся, темная материя – гало, простирающееся далеко за пределы светящейся части галактики.

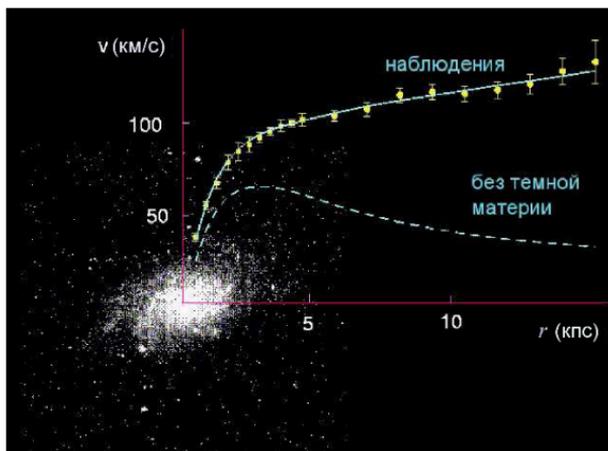


Рис. 1.4. По скоростям движения звезд вокруг центров галактик можно сделать вывод, что у галактик существует невидимое гало, масса которого превышает «видимую» массу примерно в 10 раз

Чтобы это проиллюстрировать, рассмотрим для простоты сферически симметричное распределение массы M в пространстве. Скорость обращения тела (v) массы m вокруг такой гравитирующей массы M определяется равенством центростремительной силе притяжения, которая определяется законом Ньютона. Для шара радиусом R с равномерным распределением массы по объему (то есть с постоянной плотностью) сила притяжения на расстоянии r от центра шара определяется массой $M(r)$, заключенной внутри поверхности радиуса r :

$$\frac{v^2}{r} = \frac{1}{m} G \frac{mM(r)}{r^2}.$$

Здесь $M(r) = M$ при $r > R$ и $M(r) = M r^3/R^3$ при $r \leq R$; G – гравитационная постоянная. Оказывается, что все силы от масс, расположенных на расстояниях, более удаленных от центра, точно компенсируют друг друга. Отсюда, например, вытекает, что внутри сферической оболочки гравитационные силы отсутствуют. Это доказал еще сам сэр Исаак Ньютон (1643–1727). Доказательство приводится в его фундаментальном труде «Математические начала натуральной философии» (1687).

На расстояниях $r > R$ шар притягивает, в точности как точечный объект с массой M , сосредоточенной в центре шара, так что

$$v^2 = G \frac{M}{r}.$$

На расстояниях же $r \leq R$ сила притяжения будет определяться массой, заключенной внутри поверхности радиуса r , то есть Mr^3/R^3 , и

$$v^2 = G \frac{Mr^2}{R^3}.$$

Таким образом, внутри шаровой галактики скорости звезд должны расти пропорционально расстоянию от центра ($v \sim r$), а за ее пределами – убывать ($v \sim 1/r^{1/2}$).

На рис. 1.4 для сравнения представлены зависимости от расстояния до центра галактики расчетных и наблюдаемых величин скоростей звезд.

В нашей Галактике в окрестности Солнца масса темной материи примерно равна массе обычного вещества.

2.4.2. Космологические данные

Расширяющаяся Вселенная

Имеется целый ряд фактов, говорящих о свойствах Вселенной сегодня и в относительно недалеком прошлом.

Вселенная расширяется: галактики удаляются друг от друга. Пространство растягивается во все стороны, и чем дальше от нас находится та или иная галактика, тем быстрее она удаляется от нас. Сегодня темп этого расширения невелик: все расстояния увеличатся вдвое примерно за 15 млрд лет, однако раньше темп расширения был гораздо выше. Плотность вещества во Вселенной убывает с течением времени, и в будущем она будет все более и более разреженной. Раньше Вселенная была гораздо плотнее, чем сейчас.

О расширении Вселенной прямо свидетельствует «покраснение» света, испущенного удаленными галактиками или яркими звездами: из-за общего растяжения пространства длина волны света увеличивается за то время, пока он летит к нам.

Именно это явление было установлено Эдвином Хабблом (1889–1953). В середине января 1929 г. он представил небольшую заметку под названием «О связи между расстоянием и лучевой скоростью внегалактических туманностей» в «Труды Национальной академии наук США». Его работа на основе наблюдательных данных доказывала, что галактики разлетаются друг от друга и их скорости линейно увеличиваются с расстоянием. Эта зависимость была названа законом Хаббла, а коэффициент пропорциональности – постоянной Хаббла, H . Работа Хаббла послужила наблюдательным доказательством расширения Вселенной, предсказанного в 1922 г. советским ученым А. А. Фридманом (1888–1925) на основе найденного им нового, нестационарного решения уравнений общей теории относительности.

Эйнштейн сначала не поверил результатам Фридмана. Сочтя его космологическую картину неправдоподобной, он нашел мнимую ошибку в его вычислениях. Только получив письмо от Фридмана, отстаивавшего свою правоту, и проделав еще раз вычисления, Эйнштейн в мае 1923 г. признал его результаты и в специальной заметке назвал их проливающимися новым светом на космологическую проблему.

Современные наблюдательные данные позволяют измерить не только темп расширения Вселенной в настоящее время, но и проследить за темпом ее расширения в прошлом. Сам факт расширения Вселенной вместе с теорией гравитации (общей теорией относительности) свидетельствует о том, что в прошлом Вселенная была чрезвычайно плотной и чрезвычайно быстро расширялась. Если проследить эволюцию Вселенной назад в прошлое, используя известные законы физики, то мы приходим к выводу, что эта эволюция началась с момента Большого взрыва; в этот момент вещество во Вселенной было настолько плотным, а гравитационное взаимодействие настолько сильным, что известные законы физики были неприменимы. С тех пор прошло 14 млрд лет, это возраст современной Вселенной.

В процессе расширения Вселенная охлаждалась. Сейчас о ее температуре можно судить по свойствам реликтового электромагнитного излучения. Оно характеризуется температурой $T = 2,725$ К. Максимум интенсивности реликтовых фотонов, соответствующий этой температуре, приходится на частоту 160,4 ГГц, которая лежит в радиочастотном диапазоне. Она соответствует длине волны 1,9 мм. Эта температура очень мала (ниже температуры жидкого гелия), однако в прошлом, на ранних стадиях эволюции Вселенной, она, как и плотность вещества, была гораздо выше. **Вселенная была горячей, плотной и быстро расширяющейся.**

Вселенная в возрасте 300 тысяч лет

Обсудим два этапа эволюции Вселенной, о которых сегодня имеются надежные наблюдательные данные. Один из них, относительно недавний, — это этап перехода вещества во Вселенной из состояния плазмы в газообразное состояние. Это произошло при температуре 3 000 К, а возраст Вселенной к тому моменту составлял 300 тыс. лет (совсем немного по сравнению с современными 14 млрд лет). До этого электроны и протоны, а также образовавшиеся еще раньше (в первые три минуты образования Вселенной) ядра гелия, дейтерия и лития двигались отдельно друг от друга, вещество представляло собой плазму. При температуре 3 000 К произошло объединение электронов и ядер в атомы водорода, гелия и др. Вселенная оказалась заполненной этим газом. Кинетической энергии атомов при такой температуре стало не хватать для отрыва электрона от атома (для ионизации). Важно, что плазма непрозрачна для электромагнитного излучения; фотоны все время излучаются, поглощаются, рассеиваются электронами плазмы. Газ, наоборот,

прозрачен. Значит, пришедшее к нам электромагнитное излучение с температурой 2,7 К свободно путешествовало во Вселенной с момента перехода «плазма – газ», остыв (покраснев) с тех пор в 1 100 раз из-за расширения Вселенной. Это реликтовое электромагнитное излучение сохранило в себе информацию о состоянии Вселенной в момент перехода «плазма – газ»; с его помощью мы имеем фотоснимок (буквально!) Вселенной в возрасте 300 тыс. лет, когда ее температура составляла 3 000 К.

Измеряя температуру этого реликтового электромагнитного излучения, пришедшего к нам с **разных направлений** на небе, мы узнаем, какие области были теплее или холоднее (а значит, плотнее или разреженнее), чем в среднем по Вселенной, а главное – насколько они были теплее или холоднее. Результат этих измерений состоит в том, что Вселенная в возрасте 300 тыс. лет была гораздо более однородной, чем сегодня: вариации температуры и плотности составляли тогда менее 10^{-4} (0,01 %) от средних значений. Тем не менее эти вариации существовали: с разных направлений электромагнитное излучение приходит с несколько различной температурой. Это показано на рис. 1.5, где изображено распределение температуры по небесной сфере (карта ранней Вселенной) за вычетом средней температуры 2,725 К; более холодные области показаны синим цветом, более теплые – красным.

Этот фотоснимок ранней Вселенной, изображенный на рис. 1.5, привел к нескольким важным и неожиданным выводам.

$$T = 2,725 \text{ К}, \quad \frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$$

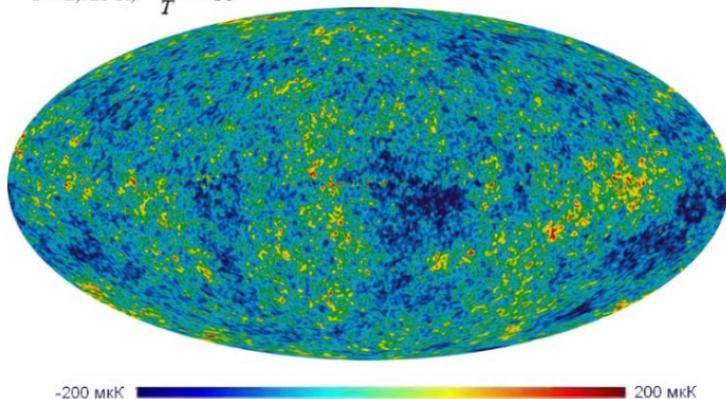


Рис. 1.5. Карта ранней Вселенной в «свете» реликтовых фотонов

Во-первых (из сравнения угловых размеров неоднородностей с их рассчитанными линейными размерами), он позволил установить, что наше трехмерное пространство с хорошей степенью точности является евклидовым. Сумма углов треугольника в нем равна 180 градусов даже для треугольников со сторонами, длины которых сравнимы с размером видимой части Вселенной, то есть сравнимы с 14 млрд световых лет. Общая теория относительности допускает, что и трехмерное пространство может быть неевклидовым (искривленным), наблюдательные же данные свидетельствуют, что это не так (по крайней мере, для нашей области Вселенной).

В случае евклидовой геометрии трехмерного пространства общая теория относительности однозначно связывает темп расширения Вселенной с **суммарной плотностью всех форм энергии**, так же как в ньютоновской теории тяготения скорость обращения Земли вокруг Солнца определяется массой Солнца. Измеренный темп расширения соответствует полной плотности энергии в современной Вселенной:

$$\varepsilon = 0,008 \frac{\text{Эрг}}{\text{м}^3}.$$

В терминах плотности массы (поскольку энергия связана с массой соотношением $E = mc^2$) это число составляет:

$$\frac{\varepsilon}{c^2} = 5 \frac{\text{масс протона}}{\text{м}^3} = 8,35 \cdot 10^{-30} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Если бы энергия во Вселенной целиком определялась энергией покоя обычного вещества, то в среднем во Вселенной было бы 5 протонов в 1 м^3 . Однако, как оказалось, обычного вещества во Вселенной гораздо меньше.

Во-вторых, из рис. 1.5 можно установить, какова была величина (амплитуда) неоднородностей температуры и плотности в ранней Вселенной – она составляла 10^{-4} – 10^{-5} от средних значений. Именно из этих неоднородностей плотности возникли галактики и скопления галактик: области с более высокой плотностью притягивали к себе окружающее вещество за счет гравитационных сил, становились еще более плотными и в конечном итоге образовывали галактики.

Поскольку начальные неоднородности плотности известны, процесс образования галактик из этих неоднородностей можно рассчитать и результат сравнить с наблюдаемым сейчас распределением галактик во Вселенной. Этот расчет согласуется с наблюдениями, только если предположить, что помимо обычного вещества во Вселенной имеется другой тип вещества – темная материя, вклад которой в полную плотность энергии сегодня составляет около 25 %.

Вселенная в первые три минуты

Другой этап эволюции Вселенной соответствует еще более ранним временам, от 1 до 200 секунд (!) с момента Большого взрыва, когда температура Вселенной достигала миллиардов градусов. В это время во Вселенной происходили термоядерные реакции, аналогичные реакциям, протекающим в центре Солнца или в термоядерной бомбе. В результате этих реакций часть протонов связалась с нейтронами и образовала легкие ядра – ядра гелия, дейтерия и лития-7 (так называемый *первичный нуклеосинтез*).

Количество образовавшихся легких ядер можно рассчитать, при этом единственным неизвестным параметром является плотность числа протонов во Вселенной (последняя, разумеется, уменьшается за счет расширения Вселенной, но ее значения в разные времена простым образом связаны между собой).

Сравнение этого расчета с наблюдаемым количеством легких элементов во Вселенной приводит к замечательному согласию для всех трех легких ядер (гелия, дейтерия и лития); согласие есть и с данными по реликтовому излучению. Это согласие свидетельствует о том, что общая теория относительности и известные законы ядерной физики правильно описывают Вселенную в возрасте 1–200 секунд, когда вещество в ней имело температуру миллиард градусов и выше. Однако важно то, что все эти данные приводят к выводу о том, что плотность массы обычного вещества в современной Вселенной составляет

$$\frac{\varepsilon}{c^2} = 0,25 \frac{\text{масс протона}}{\text{м}^3},$$

то есть обычное вещество вкладывает всего 5 % в полную плотность энергии во Вселенной.

2.4.3. Поиск частиц темной материи

Что представляют собой *частицы темной материи*? Ясно, что эти частицы не должны распадаться на другие, более легкие, иначе бы они распались за время существования Вселенной. Сам этот факт свидетельствует о том, что в природе действует **новый**, не открытый пока **закон сохранения**, запрещающий этим частицам распадаться. Аналогия здесь с законом сохранения электрического заряда: электрон – это легчайшая частица с электрическим зарядом, и именно поэтому он не распадается на более легкие частицы (например, нейтрино и фотоны). Далее, частицы темной материи чрезвычайно слабо взаимодействуют с нашим веществом, иначе они были бы уже обнаружены в земных экспериментах. Дальше начинается область гипотез. Наиболее правдоподобной (но далеко не единственной!) представляется

гипотеза о том, что частицы темной материи в 100–1 000 раз тяжелее протона и что их взаимодействие с обычным веществом по интенсивности сравнимо со взаимодействием нейтрино. Именно в рамках этой гипотезы современная плотность темной материи находит простое объяснение: частицы темной материи интенсивно рождались и аннигилировали в очень ранней Вселенной при сверхвысоких температурах (порядка 10^{15} градусов), и часть их дожила до наших дней. При указанных параметрах этих частиц их современное количество во Вселенной получается как раз такое, какое нужно.

Можно ли ожидать открытия частиц темной материи в недалеком будущем в земных условиях? Поскольку мы сегодня не знаем природу этих частиц, ответить на этот вопрос вполне однозначно нельзя. Тем не менее, перспектива представляется весьма оптимистической.

Имеется несколько путей поиска частиц темной материи. Один из них связан с экспериментами на ускорителях высокой энергии – коллайдерах. Если частицы темной материи действительно тяжелее протона в 100–1 000 раз, то они, возможно, будут рождаться в столкновениях обычных частиц, разогнанных на коллайдерах до высоких энергий. Ближайшие перспективы здесь связаны с Большим адронным коллайдером (ЛHC) в Европейском центре ядерных исследований ЦЕРН под Женевой, на котором получены встречные пучки протонов с энергией 7 ТэВ каждый. Можно, в принципе, надеяться на обнаружение на ускорителях целого класса новых частиц (в том числе и частиц темной материи) и новых взаимодействий. Но до сих пор обнаружена только одна, хотя и очень важная, частица – бозон Хиггса, подтверждающая справедливость современной Стандартной модели элементарных частиц и их взаимодействий. Новые же частицы оказываются за рамками Стандартной модели.

Тем не менее, космология подсказывает, что известными сегодня кирпичиками мир элементарных частиц далеко не исчерпывается!

Другой путь состоит в регистрации частиц темной материи, которые летают вокруг нас. Их отнюдь не мало: при массе, равной 1 000 масс протона, этих частиц здесь и сейчас должно быть 1 000 штук в кубическом метре. Проблема в том, что они крайне слабо взаимодействуют с обычными частицами, вещество для них прозрачно. Тем не менее, частицы темной материи изредка сталкиваются с атомными ядрами, и результат таких столкновений можно надеяться зарегистрировать. Поиск в этом направлении ведется в так называемых *низкофоновых экспериментах* с помощью различных высокочувствительных детекторов, в частности помещенных глубоко под землей, где резко снижен фон от космических лучей.

Ученые НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ ведут такие поиски в ряде собственных экспериментов, с использованием низкофоновых детекторов собственных разработок. Также они работают в тесном сотрудничестве с крупными международными коллаборациями, такими как подземная

лаборатория Гран-Сассо в Италии, являющаяся самой большой подземной лабораторией в мире. Основная задача таких лабораторий – регистрация нейтрино разных сортов от разных источников и изучение их свойств, но одновременно с наблюдением нейтрино в таких экспериментах можно искать и частицы темной материи.

Кроме того, частицы темной материи могут оставлять свой отпечаток на свойствах нейтрона и приводить к особенностям его взаимодействия с веществом. Поиск таких особенностей – одно из важных направлений нейтронных исследований. И это направление также развивается в Институте.

2.5. Темная энергия

Темная энергия – гораздо более странная субстанция, чем темная материя. Она не собирается в сгустки, а равномерно «разлита» во Вселенной. В галактиках и скоплениях галактик ее столько же, сколько вне их. Самое необычное то, что темная энергия в определенном смысле испытывает антигравитацию. Мы уже говорили, что современными астрономическими методами можно не только измерить нынешний темп расширения Вселенной, но и определить, как он изменялся со временем. Так вот, астрономические наблюдения свидетельствуют о том, что сегодня (и в недалеком прошлом) Вселенная расширяется с ускорением: темп расширения растет со временем. В этом смысле и можно говорить об антигравитации: обычное гравитационное притяжение замедляло бы разбегание галактик, а в нашей Вселенной, получается, все наоборот.

Такая картина, вообще говоря, не противоречит общей теории относительности, однако для этого темная энергия должна обладать специальным свойством – отрицательным давлением. Это резко отличает ее от обычных форм материи. Не будет преувеличением сказать, что природа темной энергии – главная загадка фундаментальной физики XXI в.

Один из кандидатов на роль темной энергии – вакуум. Плотность энергии вакуума не изменится при расширении Вселенной, а это и означает отрицательное давление вакуума. Другой кандидат – новое сверхслабое поле, пронизывающее всю Вселенную; для него употребляют термин «квинтэссенция». Есть и другие кандидаты, но в любом случае темная энергия представляет собой что-то совершенно необычное.

Иной путь объяснения ускоренного расширения Вселенной состоит в том, чтобы предположить, что сами законы гравитации видоизменяются на космологических расстояниях и космологических временах. Такая гипотеза далеко не безобидна: попытки обобщения общей теории относительности в этом направлении сталкиваются с серьезными трудностями.

По-видимому, если такое обобщение вообще возможно, то оно будет связано с представлением о существовании дополнительных размерностей

пространства, помимо тех трех измерений, которые мы воспринимаем в повседневном опыте.

К сожалению, сейчас не видно путей прямого экспериментального исследования темной энергии в земных условиях. Это, конечно, не означает, что в будущем не может появиться новых блестящих идей в этом направлении, но сегодня надежды на прояснение природы темной энергии (или, более широко, причины ускоренного расширения Вселенной) связаны исключительно с астрономическими наблюдениями и получением новых, более точных космологических данных. Нам предстоит узнать в деталях, как именно расширялась Вселенная на относительно позднем этапе ее эволюции, и это, надо надеяться, позволит сделать выбор между различными гипотезами.

Тем, кто хочет узнать больше про Вселенную, темную материю и темную энергию, следует обратиться к увлекательной, написанной доступным языком лекции В. А. Рубакова «Темная материя и темная энергия во Вселенной» (<http://elementy.ru/lib/25560/25567>) и статье С. Г. Рубина «Мир, рожденный из „ничего“» (<http://galspace.spb.ru/index60.html>).

Шкала доступных для наблюдения и теоретического описания расстояний, размеры различных объектов и инструменты, при помощи которых можно исследовать эти объекты, изображены на рис. 1.6.

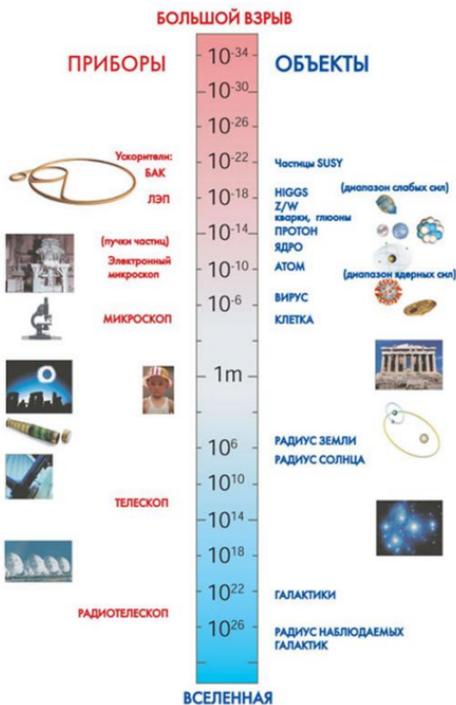


Рис. 1.6. Шкала наблюдаемых расстояний, размеры объектов и инструменты для их наблюдения

3. Использование энергии. Энергетическая шкала

3.1. Химическая энергия

Самым первым типом энергии, которую человек начал получать сам и использовать, является химическая энергия – энергия горения дров в костре. Что это такое? В процессе горения атом углерода, соединяясь с атомами кислорода, образует молекулу углекислого газа, при этом выделяется энергия. Она равна работе, которую нужно совершить, чтобы разорвать молекулу CO_2 на атом С и молекулу O_2 . Приблизительно эта величина составляет несколько электронвольт (эВ). Мы для простоты примем ее равной 1 эВ (эВ – это нестандартная единица энергии, равная энергии, до которой разгоняется электрон, помещенный между обкладками конденсатора с разностью потенциалов в 1 В). Электронвольт связан со стандартной единицей джоулем (Дж) следующим образом: $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

В 1 г углерода $\sim 0,5 \cdot 10^{23}$ атомов, то есть 1 г углерода при сгорании выделит $\sim 10^4$ Дж энергии (приблизительно столько выделяется при сгорании 1 г дров). Табличное значение удельной теплоты сгорания угля (кокс) – $3 \cdot 10^4$ Дж/г. Поэтому для наших целей такая оценка вполне достаточна. Эта цифра по порядку величины годится практически для всех горючих и взрывчатых веществ (например, максимальное тепловыделение имеет бензин: $\sim 4 \cdot 10^4$ Дж/г, а минимальное – порох, всего $0,4 \cdot 10^4$ Дж/г). Поскольку связь электронов с ядром в атоме и взаимодействие атомов в молекуле (*химическая связь*) обусловлены электрическими силами, то энерговыделение при различных химических реакциях не очень сильно отличается от нашей оценки $\sim 10^4$ Дж/г.

Нужно сказать, что использовались, конечно, и другие виды энергии (например, упругость дерева, стали, энергия падения воды, энергия ветра и т. д.).

Это механические виды энергии. Например, упругая энергия, в принципе, тоже обусловлена межмолекулярными силами, но при упругих деформациях молекулы не разрушаются, поэтому удельное энерговыделение меньше, чем при химических реакциях типа горения.

Кроме того, важна скорость выделения энергии, которая называется мощностью. Одно дело, когда чайник вскипает за час, и совсем другое, когда – за минуту. В качестве единицы мощности принят ватт: $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$.

Если в секунду сжигать грамм угля, то мощность такой плиты – $3 \cdot 10^4$ Вт, или 30 кВт (обычная электрическая плитка имеет мощность ~ 1 кВт). Для обогрева небольшой комнаты зимой нужно приблизительно в 10 раз меньше, что соответствует $\sim 8,6$ кг угля в сутки (86 400 с). А если заставить уголь сгореть очень быстро (как в порохе), скажем за 10^{-3} с, то это

будет уже взрыв. Убыстряют процесс горения разными хитроумными способами, например смешивая уголь с селитрой, из которой выделяется кислород, и, тем самым, кислород доставляется к углю сразу во всем объеме (при горении в воздухе это происходит только на поверхности угля, где он непосредственно соприкасается с воздухом).

Как мы уже говорили, химическая энергия является разновидностью энергии электрической, которой удерживаются электроны у ядра. И мы говорили, что ядро состоит из протонов (положительно заряженных частиц) и нейтронов (нейтральных частиц). Причем положительные протоны в ядре находятся на чудовищно малых расстояниях, то есть отталкиваются с огромными силами, и что-то не дает им разлететься. Это «что-то» и есть ядерные силы. Соответствующая энергия развала тяжелого ядра урана (его масса 235 ат. ед., у углерода – 12) на 2 части (аналогичная энергии развала молекулы) оказывается в $2 \cdot 10^8$ (то есть в 200 млн) раз больше энергии химической связи. В наших единицах эта энергия имеет порядок 200 МэВ (в отличие от 1 эВ).

Таким образом, учитывая, что атом урана в 20 раз тяжелее атома углерода, 1 г ядерного топлива может дать энергии столько же, сколько 10 тонн химического (а 1 кг – 10 кг). Отсюда и возникло понятие *тротилового эквивалента (ТЭ)* ядерной бомбы. Эту энергию удалось впервые освободить в 1942 г., когда Ферми построил первый атомный реактор. В конце Второй мировой войны, 16 июля 1945 г., на полигоне в штате Нью-Мексико американцами был проведен первый в мире успешный испытательный взрыв ядерной бомбы мощностью около 21 кт в тротиловом эквиваленте, а 6 и 9 августа были сброшены бомбы на японские города Хиросиму и Нагасаки.

Утром 6 августа 1945 г. американский бомбардировщик В-29 *Enola Gay* под командованием полковника Пола Тиббетса сбросил на Хиросиму атомную бомбу *Little Boy* («Малыш») эквивалентом от 13 до 18 кт тротила (рис. 1.7). Три дня спустя атомная бомба *Fat Man* («Толстяк») была сброшена на Нагасаки пилотом Чарльзом Суини, командиром бомбардировщика В-29 *Bockscar* (рис. 1.8, 1.9).

Общее количество погибших составило от 90 до 166 тысяч человек в Хиросиме, от 60 до 80 тысяч в Нагасаки. За считанные секунды были стерты с лица Земли два города.

Эти взрывы продемонстрировали, насколько близко человечество приблизилось к краю гибели, овладев такими невиданными ранее источниками энергии, а также степень ответственности тех, кто такими источниками обладает.



Рис. 1.7. Макет ядерной бомбы *Little Boy*



Рис. 1.8. Ядерная бомба *Fat Man*

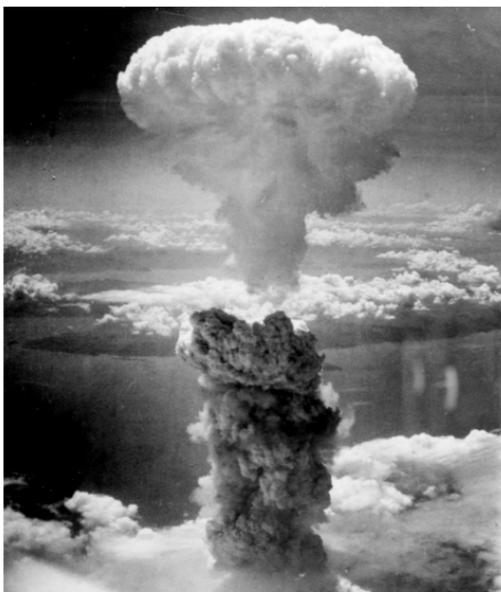


Рис. 1.9. Взрыв ядерной бомбы, сброшенной 9 августа 1945 г. на Нагасаки

У нас в стране первое успешное испытание бомбы было проведено в 1949 г. (рис. 1.10), а 27 июня 1954 г. в СССР, в городе Обнинске, расположенном в Калужской области, построена и введена в эксплуатацию первая в мире промышленная *атомная электростанция* (АЭС) мощностью 5 МВт, в которой использовалась энергия, выделяющаяся в управляемой *цепной ядерной реакции* деления ядер урана нейтронами. Эта станция положила начало новой – *ядерной энергетике*. В 1958 г. была введена в эксплуатацию первая очередь Сибирской АЭС мощностью 100 МВт, которая впоследствии была доведена до 600 МВт. В том же 1958 г. развернулось строительство Белоярской АЭС, а 26 апреля 1964 г. ее генератор дал ток потребителям.



Рис. 1.10. Макет первой советской атомной бомбы РДС-1. Длина ее составляла 3,7 м, диаметр – 1,5 м, масса – 4,6 т (Музей ядерного оружия, г. Саров)

За пределами СССР первая АЭС промышленного назначения мощностью 46 МВт была введена в эксплуатацию в 1956 г. в Колдер Холле (Великобритания). Через год вступила в строй АЭС мощностью 60 МВт в Шиппингпорте (США).

Тем самым настала совершенно **новая эра в истории человечества**. Человек перестал зависеть от энергии Солнца, поскольку все прежние виды энергии были фактически связаны с использованием накопленной энергии Солнца. Уголь и нефть возникли благодаря органической жизни, которая сама появилась при непосредственном участии Солнца, фотосинтез у растений происходит при воздействии ультрафиолетовых лучей.

Ветры, бури, циклоны, движение рек – вся эта гигантская динамо-машина возникает также в результате преобразования энергии солнечных лучей, которые неравномерно нагревают Землю. В результате в одном месте вода испаряется, выливаясь в другом месте в виде дождя, горячие массы влажного воздуха поднимаются вверх, возникают перепады давлений, что приводит к перемещениям масс воздуха, электризации капелек воды и, как следствие, к ураганам, грозам, постоянному течению рек, таянию и замерзанию снегов и т. д.

Сейчас на долю атомных электростанций приходится около 11 % общемирового производства электроэнергии. Мировыми лидерами в производстве ядерной электроэнергии являются (табл. 1.2): США (805,7 млрд кВт · ч/год – 20 % всего производства энергии в США), Франция (381,8 млрд кВт · ч/год – 71,6 % всего производства электроэнергии Франции), Япония (292,9 млрд кВт · ч/год – 3,6 %), Россия (190,1 млрд кВт · ч/год – 17,8 %), Корея (141,3 млрд кВт · ч/год – 27 %) и Германия (72,6 млрд кВт · ч/год – 11,6 %). В настоящее время 31 страна эксплуатирует атомные электростанции. По состоянию на 2018 г. в мире действует 451 энергетический ядерный реактор общей мощностью 394 ГВт, 55 реакторов находятся в стадии сооружения. Российская компания «ТВЭЛ» поставляет топливо для 76 реакторов (17 % мирового рынка).

Таблица 1.2

Данные по атомным электростанциям на 31 декабря 2017 г.

Страна	Мощность, МВт	Выработка, ГВт · ч	Доля, %	Количество станций	Количество блоков
 Аргентина	1 633	5 716,27	4,5	2	3
 Армения	375	2 411,39	32,5	1	1
 Бельгия	5 918	40 186,70	49,9	2	7
 Болгария	1 926	14 872,26	34,3	1	2
 Бразилия	1 884	14 854,33	2,7	1	2
 Великобритания	8 918	63 886,83	19,3	7	15
 Венгрия	1 889	15 218,92	50	1	4
 Германия	10 799	72 162,80	11,6	7	8
 Индия	6 255	20 004,34	3,2	7	22

Страна	Мощность, МВт	Выработка, ГВт · ч	Доля, %	Количество станций	Количество блоков
 Иран	915	6 366,21	2,2	1	1
 Испания	7 121	55 627,75	21,2	5	7
 Канада	13 554	95 131,20	14,6	4	19
 Китай	34 514	232 796,74	3,9	13	39
 Мексика	1 552	10 571,92	6,0	1	2
 Нидерланды	482	3 263,18	2,9	1	1
 Пакистан	1 318	8 108,93	6,2	3	5
 Россия	26 142	190 115,15	17,8	10	35
 Румыния	1 300	10 580,15	17,7	1	2
 Словакия	1 814	14 015,82	54	2	4
 Словения	688	5 967,83	39,1	1	1
 США	99 952	805 647,33	20	60	99
 Тайвань	5 052	21 560,47	9,3	3	6
 Украина	13 107	80 405,85	55,1	4	15
 Финляндия	2 764	21 573,97	33,2	2	4
 Франция	63 130	381 846,02	71,6	19	58
 Чехия	3 930	26 784,68	33,1	2	6
 Швейцария	3 333	19 590,70	33,4	4	5
 Швеция	9 102	63 062,89	39,6	3	9
 ЮАР	1 860	15 087,29	6,7	1	2
 Южная Корея	23 070	141 278,32	27,1	6	25
 Япония	39 752	29 285,05	3,6	17	42
В мире	394 054	2 487 981,29	10,9	191	451

3.2. Ядерная энергия

С открытием ядерной энергии человек, в принципе, получил возможность существовать и тогда, когда Солнце погаснет (что произойдет очень нескоро, через несколько миллиардов лет), то есть стать независимым от солнечной энергии.

Поэтому, когда немецкие ученые Отто Ган и Фриц Штрассман перед самой войной, в 1939 г., опубликовали сообщение об открытии деления урана нейтронами, реакция была мгновенной, все страны поняли важность и, в первую очередь, военное значение открытия и засекретили исследования по ядерной физике.

Оказывается, когда нейтрон попадает в ядро урана, последнее делится на 2 ядра приблизительно одинаковой массы, но при этом вылетают 2–3 новых нейтрона, которые вызывают новые деления, в результате происходит цепная реакция. За n шагов (если считать, что вылетают 2 нейтрона) произойдет 2^n делений (рис. 1.11, 1.12).

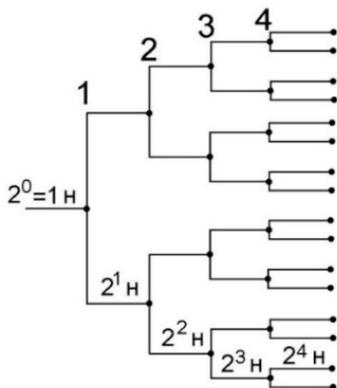


Рис. 1.11. Схематическое изображение цепной реакции. Через четыре последовательных акта деления урана при поглощении 1 нейтрона получаются уже 2^4 нейтронов

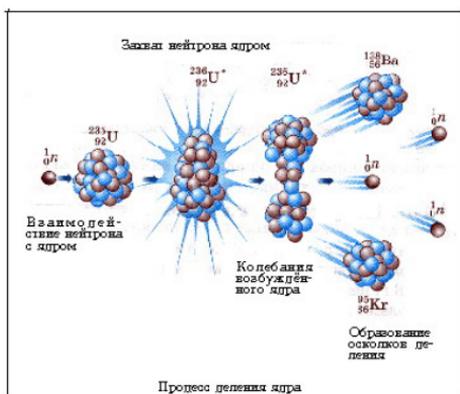
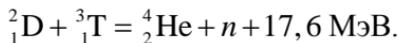


Рис. 1.12. Реакция деления ^{235}U нейтроном, лежащая в основе цепной реакции

Чтобы распался 1 г ^{235}U ($\sim 10^{21}$ атомов; $10^3 \approx 2^{10}$, то есть $10^{21} \approx 2^{70}$), нужно всего 70 шагов. При каждом делении выделяется ~ 200 МэВ энергии (в 200 млн раз больше, чем при одном акте химической реакции). Это и есть ядерная энергия, которой человечество уже достаточно хорошо научилось управлять.

3.3. Термоядерная энергия

Однако энергия может выделяться не только при делении тяжелых ядер, но и при слиянии легких. Самое стабильное ядро – это ядро атома железа, поэтому более тяжелым ядрам выгодно делиться, а более легким – слипаться, образуя более тяжелые ядра. Например,



Здесь ${}^2_1\text{D}$ – это дейтрон (ядро дейтерия, или тяжелого водорода), состоящий из протона и нейтрона, ${}^3_1\text{T}$ – тритон (ядро трития, или сверхтяжелого водорода), состоящий из протона и двух нейтронов.

Такие реакции слияния имеют удельное энерговыделение (на единицу массы) еще в несколько раз больше, чем реакции деления. Они называются *термоядерными*, и вот почему. Как мы говорили, ядра положительно заряжены, а ядерные силы, которые удерживают ядра от развала, действуют на очень коротких расстояниях: $\sim 10^{-13}$ см. Чтобы произошло слияние ядер, их нужно сблизить до такого расстояния, а следовательно, нужно разогнать так, чтобы преодолеть кулоновское отталкивание. Этого можно достигнуть, разогрев смесь до температуры в несколько миллионов градусов. Такие температуры достигаются при взрыве ядерной бомбы. Поэтому первые реакции слияния удалось осуществить во взрывах так называемых *термоядерных*, или *водородных, бомб* (первый в мире термоядерный взрыв *Mike* мощностью 10,4 Мт ТЭ произвели США 1 ноября 1952 г.; СССР – в августе 1953 г.). Следует заметить, в США было взорвано громоздкое, многоэтажное и не-транспортабельное устройство, а первая настоящая авиационная бомба была впервые создана и испытана в СССР. Это знаменитая «слойка» (рис. 1.13), в работе над которой активное участие принимал А. Д. Сахаров, тогда молодой сотрудник теоретической группы, руководителем которой был И. Е. Тамм.

Осенью 1961 г. на полигоне Новой Земли прошло испытание самой мощной в мире бомбы АН602 (она же «Царь-бомба» и «Кузькина мать»), рис. 1.14. Характеристики изделия: длина почти 10 м, масса – 26,5 т. Но главный показатель – мощность заряда. Первоначально она составляла 100 Мт ТЭ. Чтобы представить себе эту мощность, нужно все снаряды Второй мировой войны сложить в одну высоченную гору, увеличить ее в 20 раз, тогда и получится заряд, эквивалентный по мощности тому, который готовился к испытанию в 1961 г. По предложению А. Д. Сахарова мощность заряда была снижена вдвое для сокращения до приемлемого уровня количества радиоактивных осадков. 30 октября 1961 г. самолет Ту-95В с реальной бомбой на борту вылетел с аэродрома Оленья и взял курс на Новую Землю. В испытаниях участвовал также самолет-лаборатория Ту-16А. Через два

часа после вылета бомба была сброшена с высоты 10 500 м по условной цели и через 188 с барометрически взорвана на высоте 4 200 м над уровнем моря (4 000 м над целью). Взрыв был такой силы, что сейсмическая волна в земной коре, порожденная ударной волной, три раза обошла вокруг Земли. Вспышка была видна на расстоянии более 1 000 км. Ядерный гриб взрыва поднялся на высоту около 70 км, диаметр его двухъярусной «шляпки» у верхнего яруса достиг 95 км. Диаметр купола из раскаленных продуктов – 20 км.



Рис. 1.13. Знаменитая «слойка» РДС-6с – первая в мире водородная (термоядерная) бомба (Музей ядерного оружия, г. Саров)



Рис. 1.14. «Царь-бомба» (Музей ядерного оружия, г. Саров)

Для обеспечения безопасности самолета-носителя московские конструкторы парашютно-десантной техники разработали специальную систему из шести парашютов (площадь самого большого равнялась 1 600 м²). Они выбрасывались из хвостовой части корпуса бомбы один за другим и замедляли снижение бомбы, так что самолет успевал к моменту взрыва отойти на безопасное расстояние: так, самолет-носитель улетел на расстояние 39 км, а самолет-лаборатория – на 53,5 км.

Испытание 30 октября 1961 г. показало, что разработки в области ядерного оружия могут быстро перешагнуть критический для существования человечества предел. В августе 1963 г. США, СССР и Великобритания подписали Договор о запрещении испытаний ядерного оружия в космическом пространстве, под водой и на поверхности Земли. После вступления Договора в силу Советский Союз производил только подземные ядерные испытания.

С 1949 по 1990 г. в СССР было проведено 715 ядерных взрывов, из них 156 – в мирных целях, 494 – подземных. В США с 1945 по 1992 г. было проведено 1 056 ядерных взрывов, из них 27 – в мирных целях, 723 – подземных. По сравнению с США СССР провел примерно в 1,5 раза меньше ядерных испытаний, но их суммарная мощность примерно в 1,5 раза больше.

В настоящее время осуществляется проект международного экспериментального *термоядерного реактора (ИТЭР)*. Странами – участницами проекта являются США, Япония, Китай, Индия, Южная Корея, Россия, а также страны ЕС. Задача ИТЭР заключается в демонстрации возможности коммерческого использования термоядерного реактора и решении физических и технологических проблем, которые могут встретиться на этом пути.

Проектирование реактора закончено, выбрано место для его строительства – исследовательский центр Кадараш (фр. *Cadarache*) на юге Франции, в 60 км от Марселя. Подготовка строительной площадки в Кадараше началась в январе 2007 г.

Первоначально название *ITER* было образовано как сокращение от англ. *International Thermonuclear Experimental Reactor*, но в настоящее время оно официально не считается аббревиатурой, а связывается с латинским словом *iter* – путь.

Планируется завершить строительство экспериментального термоядерного реактора ИТЭР в 2025 г. Первые реакции термоядерного синтеза планируется осуществить не раньше 2026 г. К 2037 г. запланировано проведение экспериментов, по завершении которых проект будет закрыт. После 2040 г. реактор станет производить электроэнергию (при условии успешности экспериментов). В целом сооружения ИТЭР будут представлять собой 60-метровый колосс весом 23 тыс. тонн.

Первые такие установки для осуществления управляемой реакции термоядерного синтеза были созданы у нас, в СССР. Это «токамак» (тороидальная камера магнитная), в котором осуществляется термоядерная реакция в горячей плазме, в квазистационарном режиме, причем плазма создается в камере, где удерживается и стабилизируется магнитным полем.

В проекте ИТЭР будет использован токамак нового поколения, в котором будет происходить описанная выше термоядерная реакция слияния дейтона и тритона в дейтериево-тритиевой плазме. Схематическое изображение реактора ИТЭР приведено на рис. 1.15.

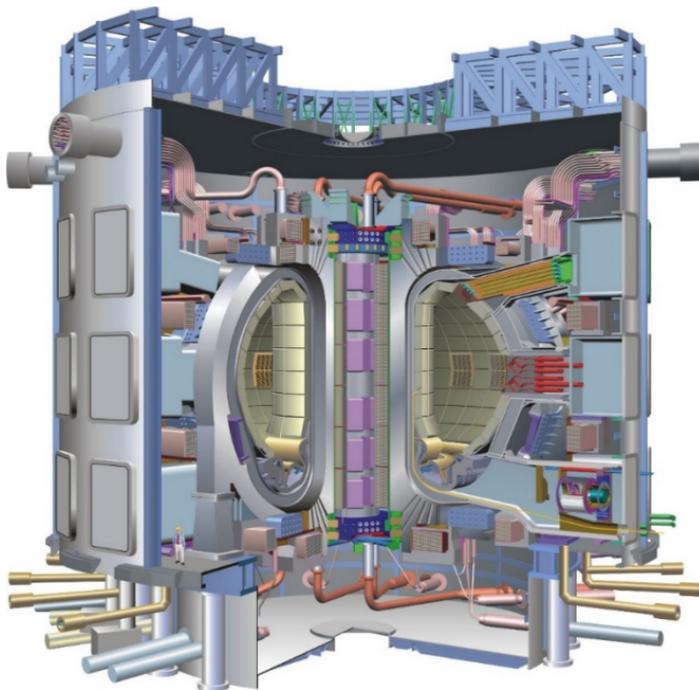


Рис. 1.15. Схема термоядерного реактора ИТЭР

Успешное завершение проекта может стать одним из важнейших результатов в истории развития человечества, поскольку обеспечит доступ к практически неограниченному источнику энергии. Кроме того, такие источники энергии будут гораздо более безопасными, чем атомные, и практически чистыми. Они смогли бы не увеличивать естественный радиоактивный фон на Земле, как это делают ядерные реакторы, а, наоборот, уменьшать, перерабатывая радиоактивный тритий в стабильный гелий.

Сейчас строительство ИТЭР идет полным ходом (рис. 1.16.).



Рис. 1.16. Площадка термоядерного реактора ИТЭР (2018)

В природе термоядерные реакции идут в недрах звезд, в том числе и на Солнце. Эти реакции обуславливают эволюцию звезд. Сначала в звезде выгорает водород, превращаясь в гелий (от др.-греч. Ἠέλιος – Солнце; впервые был обнаружен на Солнце по спектру солнечных лучей). Далее начинается выгорание гелия и так далее, пока процесс синтеза не остановится на стадии железной звезды, поскольку дальнейший синтез становится энергетически невыгодным (как мы уже говорили, ядра железа самые стабильные). Чтобы производить более тяжелые элементы, нужно уже затрачивать энергию. В итоге звезда либо медленно охлаждается, и процесс ее эволюции заканчивается, либо под действием гравитации (если звезда достаточно массивная) она начинает сжиматься и разогреваться, что может привести, например, к взрыву сверхновой звезды, в результате которого может остаться либо нейтронная звезда, либо черная дыра (опять же в зависимости от массы этого остатка). Наиболее тяжелые элементы синтезируются как раз при взрывах сверхновых звезд. Как это происходит – отдельная и очень увлекательная тема. Проблема *вторичного*, или *звездного*, *нуклеосинтеза* до сих пор полностью не решена. Еще имеется много загадок, особенно в части происхождения наиболее тяжелых элементов.

Образование химических элементов (за исключением водорода и большей части гелия), из которых сформировалась Солнечная система, произошло в звездах предшествующего Солнцу поколения. Из наблюдения продуктов распада исчезнувших короткоживущих изотопов в метеоритах есть основания полагать, что Солнечная система образовалась из газопылевого облака – остатка взрывов сверхновых – горячих массивных звезд, имеющих

сравнительно короткое время жизни. Эти звезды прошли все этапы звездного нуклеосинтеза, предшествующие взрыву. Таким образом, Солнце есть звезда *второго поколения*. В спектре Солнца отождествлены линии более 70 химических элементов. Исходя из наблюдательных данных о распространённости элементов в Солнце, было сделано заключение, что в хорошем приближении относительное содержание их согласуется с содержанием элементов для Земли и метеоритов, хотя есть и различия в деталях. Имеется явное расхождение в количестве легких элементов лития и бериллия, которых в Земле и метеоритах гораздо больше, чем в Солнце. Ядра этих атомов легко разрушаются в ядерных реакциях при температуре Солнца. Земля и метеориты, в свою очередь, по сравнению с Солнцем бедны легкими летучими элементами.

Следует хорошо понимать, что открытие новых источников энергии налагает на людей большую ответственность за ее использование. Повышаются требования к компетентности, грамотности и образованию не только действующего персонала, связанного непосредственно с такими источниками, но и руководителей всех уровней. Поскольку в данном случае любая некомпетентность, безответственная или преступная неосторожность в обращении со столь огромными концентрациями энергии, к которым в настоящее время получен доступ, может привести к трагическим последствиям для всего человечества.

Часть 2. СТРУКТУРА ВЕЩЕСТВА

2.1. Представления о строении атома

Понятие об атоме (др.-греч. ἄτομος – неделимый) как о наименьшей неделимой части материи было введено древнегреческими философами (V–IV в. до н. э.).

Философы Древней Индии приблизительно в то же время также считали материальные вещи, пространство и время состоящими из вечных, тончайших частичек.

В Европе атомизм впервые появился в трудах древнегреческих философов Левкиппа, Демокрита, Платона и Эпикура, живших в V–III вв. до н. э. По их учению, существуют только атомы и пустота. Все явления природы они объясняли движением этих невидимых частиц. Платон считал, что атомы имеют форму идеальных «платоновских» тел (правильных многогранников).

Противники атомизма полагали, что материя может делиться до бесконечности. К ним относился Аристотель (ученик Платона), считавший, что бесформенная материя представляет собой небытие, первично оформленная материя выражена в виде пяти первоэлементов (стихий): воздух, вода, земля, огонь и эфир (небесная субстанция), рис. 2.1.



Рис. 2.1. Модель Аристотеля

Эти представления Аристотеля господствовали более тысячи лет, как и его геоцентрическая модель мира, развитая Птолемеем, жившим приблизительно на 200 лет позднее: Земля является центром Вселенной, вокруг которого с различными скоростями вращаются небесные сферы. Учение Птолемея достаточно хорошо описывало движение планет и Солнца относительно неподвижных звезд и не подвергалось сомнению вплоть до работы Николая Коперника (1473–1543) «О вращении небесных сфер», опубликованной в 1543 г., в которой он обосновал гелиоцентрическую систему мира и доказал, что Земля сама вращается вокруг Солнца. Однако в 1616 г., при папе Павле V, католическая церковь официально запретила теорию Коперника. Книга была исключена из римского Индекса запрещенных книг лишь в 1835 г.

Также и учение об атомах возродилось лишь в XV–XIX в. благодаря трудам того же Николая Коперника, Роберта Бойля, Исаака Ньютона, М. В. Ломоносова, Майкла Фарадея, Антуана Лавуазье, Амедео Авогадро, Джона Дальтона и др.

Основоположником современной атомно-молекулярной теории можно считать Дж. Дальтона (1766–1844), который в своих работах по атомистике в 1903 г. ввел в науку понятие атомного веса (атомной массы), приняв за единицу вес водорода, и открыл закон кратных отношений. По Дальтону, атом – мельчайшая частица химического элемента, отличающаяся от атомов других элементов своей массой, молекулы же могут состоять только из *целого* числа атомов.

Атомно-молекулярное учение окончательно утвердилось лишь к середине XIX в. В 1860 г. на Международном конгрессе химиков в Карлсруэ впервые были точно определены понятия **атомного и молекулярного весов, молекулы и атома**. Было принято, что **молекула** – это наименьшее количество вещества, вступающее в реакции и определяющее физические свойства, а **атом** – наименьшее количество элемента, содержащееся в молекулах.

Однако в конце XIX – начале XX в. произошли великие открытия в физике, которые в очередной раз изменили представления человечества об атоме. Было разрушено представление о главном свойстве атома – его неделимости. На рис. 2.2 показано, как выглядит атом гелия по современным представлениям.

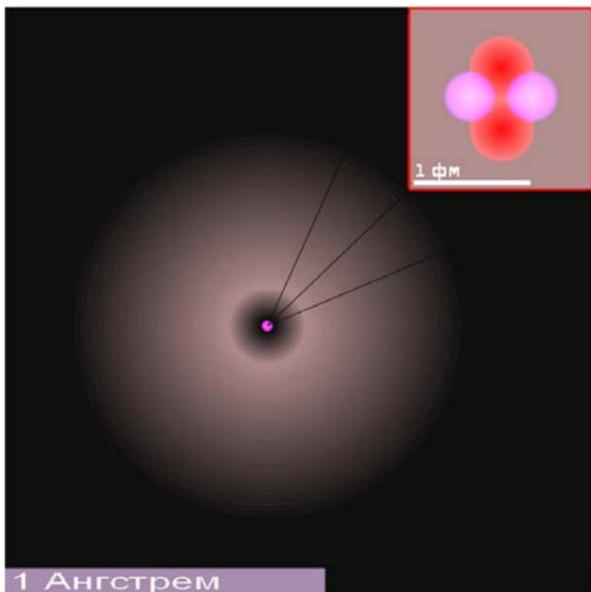


Рис. 2.2. Современное представление об атоме гелия. В центре находится ядро размером порядка 1 ферми (Фм) ($1\text{Фм} = 10^{-13}\text{см}$), состоящее из четырех нуклонов (двух протонов и двух нейтронов), а вокруг двигаются электроны, образуя электронное облако с размерами порядка 1 ангстрема (Å) ($1\text{Å} = 10^{-8}\text{см}$). Причем вся масса атома сосредоточена в очень малой области по сравнению с размерами атома – в области ядра (нуклон приблизительно в 1 800 раз тяжелее электрона, $1\text{Å} = 100\,000\text{Фм}$)

2.2. Открытие катодных лучей

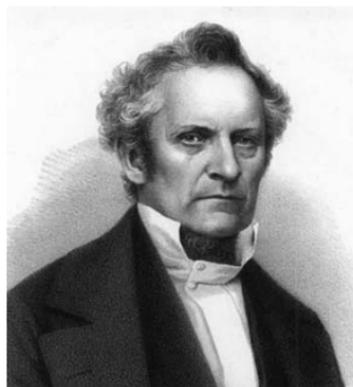
Все началось с открытия катодных лучей. Примерно в середине прошлого века Юлиус Плюккер оставил свои занятия геометрией, которые не нашли признания среди современников, и увлекся опытной физикой. Когда мы наблюдаем игру световых реклам, этим зрелищем обязаны профессору математики из Боннского университета, именно Плюккер в 1855 г. изобрел эти светящиеся трубки.

Юлиус Плюккер (*Julius Plücker*; 1801–1868). Немецкий математик и физик Ю. Плюккер родился в Эльберфельде. Изучал физику и математику в Бонне, Берлине, Гейдельберге и Париже. В 1824 г. защитил диссертацию на степень доктора философии в Марбургском университете. В 1825–1828 гг. – приват-доцент, в 1828–1833 гг. и 1836–1868 гг. – профессор Боннского университета. В 1834–1836 гг. – профессор университета в Галле. Член Парижской академии наук (1867).

Физические работы Плюккера посвящены изучению магнетизма, электрических разрядов в газах, действия магнитного поля на эти разряды, спектров газов, катодных лучей. В 1855 г. он сконструировал газоразрядные трубки. В 1859 г. установил, что спектр газового разряда характеризует природу этого газа, обнаружил три первых линии в спектре водорода, исследовал флюоресценцию стекла трубки. В том же 1859 г. открыл катодные лучи. С 1861 г. исследовал (с И. В. Гитторфом) спектры водорода, кислорода, йода, азота и ввел (1865) деление спектров на линейчатые и полосатые. Сконструировал (с Г. Гейслером) стандартный термометр. В 1847 г. открыл магнитные свойства кристаллов турмалина и, независимо от М. Фарадея, парамагнетизм кислорода.

Такие трубки называли гейслеровыми, по имени знаменитого стеклодува Генриха Гейслера, который был техническим ассистентом Плюккера и научился особенно искусно их изготавливать; а еще полвека спустя они уже повсеместно стали называться трубками Крукса.

В 1858 г. Гейслер сделал ртутную вакуумную трубку, в которой при очень низком давлении высоковольтный разряд между электродами порождает свечение (рис. 2.3). Плюккер установил, что проводимость газа в этой трубке зависит от его концентрации и возрастает, если часть газа из трубки откачать. При этом каждый газ начинает светиться своим характерным цветом, так что по цвету свечения можно определить состав газа в трубке (к этому выводу Плюккер пришел даже раньше Кирхгофа и Бунзена, но не понял его значения). Если увеличивать разрежение в трубке, то вблизи катода появляется темное пространство («катодное пятно»), которое при дальнейшем откачивании газа из трубки расши-



Генрих Иоганн Вильгельм Гейслер (*Johann Heinrich Wilhelm Geissler*; 1815–1879)

рывается и, наконец, заполняет ее всю: трубка перестает светиться. Но это темное пространство «живет», его пронизывают какие-то «лучи», хоть и невидимые для глаза (как невидима летящая пуля, пока не встретит препятствия на своем пути).

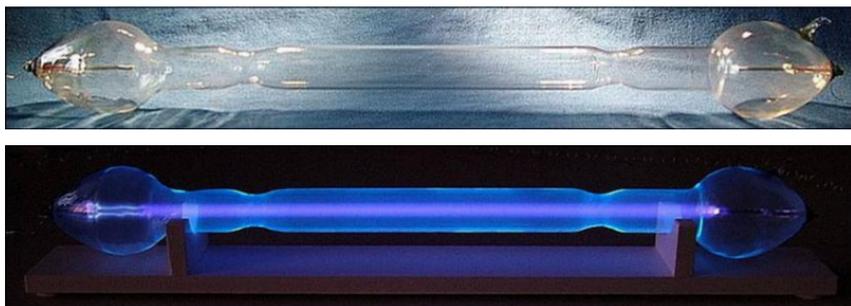


Рис. 2.3. Вакуумная трубка

Ученик Плюккера, Евгений Гольдштейн (1850–1931), в 1876 г. дал им название – **катодные лучи**, но он полагал, что по своей природе они аналогичны свету с той лишь разницей, что свет испускается телом вокруг себя по всем направлениям, а катодные лучи испускаются лишь перпендикулярно поверхности катода, но оба процесса относятся к волновым. Еще раньше, в 1869 г., другой ученик Плюккера, Иоганн Вильгельм Гитторф (1824–1914), получив в разрядной трубке вакуум со степенью разрежения ниже одного миллиметра ртутного столба, заметил, что свечения трубки смещаются под действием магнита, то есть обнаружил отклонение этих лучей в магнитном поле (рис. 2.4). В 1871 г. Кромвель Варли (1828–1883) – знаменитый американский инженер, чье имя обычно связывают с развитием электрической телеграфной связи и прокладкой трансатлантического телеграфного кабеля, – опубликовал статью, в которой предположил, что катодные лучи – это заряженные частицы («частицы электричества»), поскольку на них действует магнитное поле. Он был уверен, что их можно отклонить электрическим полем, но доказать этого ему так и не удалось.

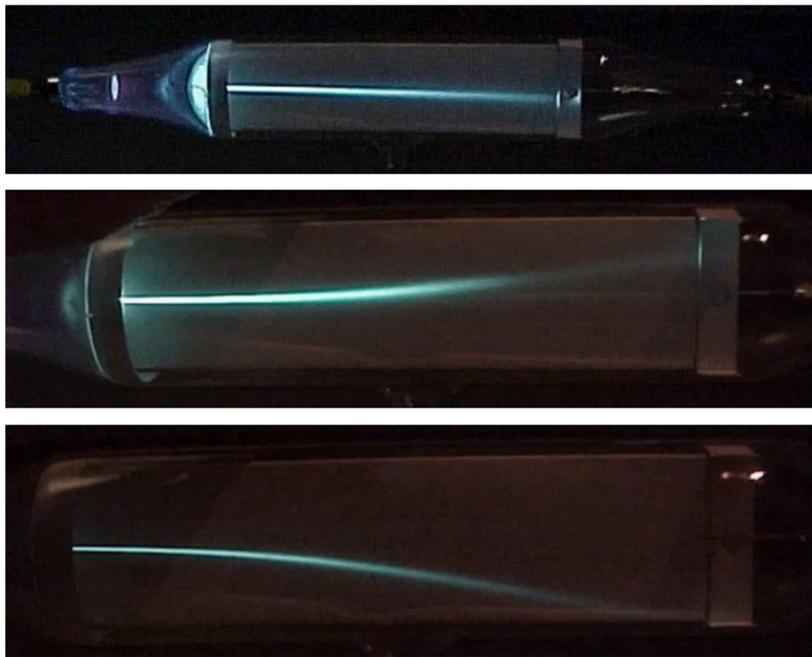


Рис. 2.4. Отклонение катодных лучей магнитом

Итак, 70-е гг. XIX столетия: имеется набор интересных фактов, однако связи между ними не видно. Нужна была руководящая идея. Такая идея возникла после блестящих опытов, которые произвел Уильям Крукс – английский физик и химик.

2.3. Опыты Крукса с катодными лучами

Уильям Крукс прежде всего с помощью усовершенствованного вакуумного насоса гораздо сильнее откачал воздух из трубки Гейслера. При этом от катода отделилось еще одно, более темное, пространство, которое постепенно заполнило всю трубку, после чего анод вспыхнул зеленоватым светом. Тот день в 1878 г., когда это произошло, можно считать днем рождения электронно-лучевой трубки – основной части телевизора XX в. Но для Крукса это было только началом – он стал тщательно изучать свойства излучения, которое он называл лучистой материей (этот термин ввел Фарадей еще в 1816 г.).



Сэр Уильям Крукс (*Sir William Crookes*; 1832–1919) – английский химик и физик, член (с 1863 г.) и президент (1913–1915) Лондонского королевского общества. В 1897 г. королева Виктория пожаловала ему рыцарское звание. Крукс вошел в историю как человек, открывший таллий и впервые получивший гелий в лаборатории.

С 1855 г. Крукс – профессор химии в Честере. С 1859 г. оставил преподавание и посвятил себя научным работам в лаборатории, оборудованной в Лондоне на собственные средства. Он исследовал электрическую проводимость в газах при пониженном давлении и катодные лучи (в трубках

Крукса), открыл явление сцинтилляции, изобрел радиометр и спинтарископ (устройство для регистрации альфа-лучей). С энтузиазмом принял на вооружение метод спектрального анализа, открытый Бунзеном и Кирхгофом. В 1861 г. открыл прежде неизвестный элемент (с ярко-зеленым цветом в эмиссионной части спектра) и назвал его таллием (гр. *thallos* – зеленый побег), а в 1895 г. впервые в лабораторных условиях выявил гелий. Крукс считается пионером в создании вакуумных труб; его исследования послужили основой для всей последующей работы по изучению плазмы.

В 1878 г. Крукс высказал гипотезу, что флуоресценцию вызывают лучи, когда ударяются о стеклянные стенки трубки. Он показал, что эти (катодные) лучи испускает отрицательный электрод (катод). Помещенный внутрь трубки крестообразный предмет отбрасывал тень на противоположную стенку (рис. 2.5). Как оказалось, эти лучи состоят из некоторой субстанции и несут отрицательный электрический заряд (ударяясь о лопасти легкого колесика, лучи приводят его во вращение, а пучок лучей отклоняется магнитом в сторону, соответствующую отрицательному заряду).

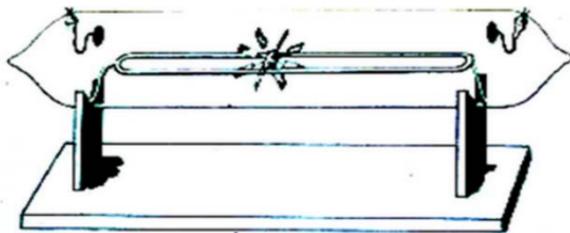


Fig. 1. From *Electrical Engineer (New York)*, 21: 237, March 4, 1896.

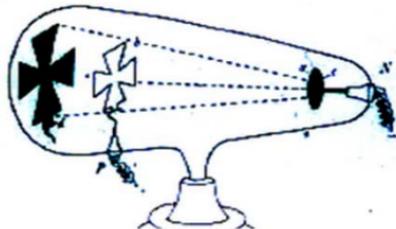


Рис. 2.5. Схема опыта Крукса с мальтийским крестом (1896)

Одним из первых Крукс начал систематическое изучение распространения электрического разряда в стеклянных трубках Гейслера, наполненных разреженными газами. Такие трубки испускали яркое свечение, будучи подключены к высоковольтной обмотке индукционной катушки. Крукс установил, что характер разряда в трубке меняется в зависимости от давления и разряд полностью исчезает при высоком вакууме. При этом он впервые предположил существование четвертого агрегатного состояния веществ – плазменного. В 1879 г. Крукс писал: «Явления в откачанных трубках открывают для физической науки новый мир, в котором материя может существовать в четвертом состоянии». (Много позже, в 1904 г., Крукс изобрел спинтарископ – прибор для регистрации альфа-частиц.)

Опираясь на эти факты, Уильям Крукс утверждал: катодные лучи, или лучистая материя, есть поток быстрых отрицательных частиц. Однако корпускулярной концепции природы катодных лучей противостояла волновая концепция.

Крукс полагал, что катодные лучи есть молекулы остаточного газа, содержащегося в газоразрядной трубке; соприкоснувшись с катодом, они получают от него отрицательный заряд и отталкиваются от катода. Но тогда они должны отклоняться электрическим полем. Опыты же, которые проводил Генрих Герц (1857–1894) показали, что электрическим полем они не отклоняются. В 1892 г. Герц опытным путем убедился в том, что катодные лучи могут проходить сквозь тонкие алюминиевые пластинки. Но если это

так, то непонятно, каким образом наэлектризованные молекулы могут проходить сквозь металл. С другой стороны, магнитное поле на световые волны не действует, а опыты Крукса показывали, что данное поле действует на катодные лучи. Таким образом, в начале 90-х гг. XIX в. возникла проблема, которая нуждалась в разрешении. Что есть катодные лучи – волны или частицы?

Окончательный ответ на эти вопросы был получен в опытах Ж. Перрена, Дж. Дж. Томсона и Э. Вихерта.

2.4. Открытие электрона

2.4.1. Опыты Перрена

На рис. 2.6 показана схема опыта, который осуществил в 1895 г. **Жан Батист Перрен**. Внутри разрядной трубки перед катодом на расстоянии 10 см помещался соединенный с электроскопом металлический цилиндр $ABCD$ (закрытый кожухом $EFGH$) с небольшим отверстием напротив катода.

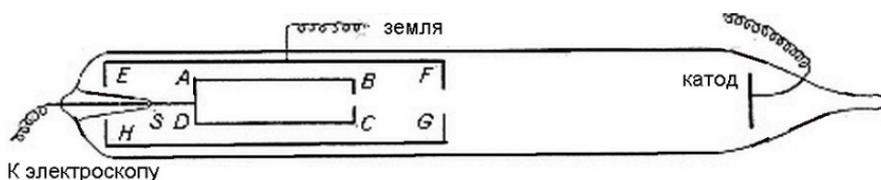


Рис. 2.6. Схема опыта Перрена

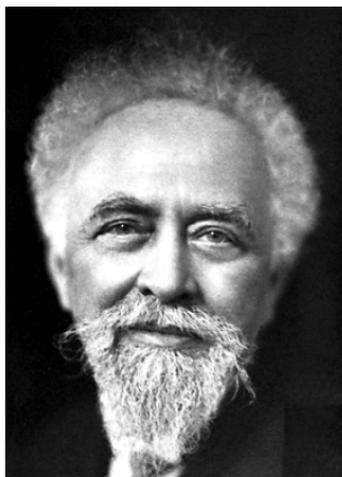
При работе трубки в цилиндр проникал пучок катодных лучей, при этом цилиндр всегда получал отрицательный заряд. Если с помощью магнита отклоняли катодные лучи так, чтобы они не попадали внутрь цилиндра, электроскоп не давал никаких показаний. Уже отсюда можно было заключить, что катодные лучи несут отрицательные электрические заряды, а стало быть, речь идет о потоке частиц. Однако сторонники волновой концепции выдвигали следующее возражение. Допуская, что катод может излучать заряженные частицы, они отрицали, что именно эти частицы являются катодными лучами. При попадании катодных лучей на стенку трубки последняя начинала светиться, но свечение и выброс катодом частиц, по их мнению, могли быть двумя разными явлениями, подобно тому как разными явлениями представляются вылет из ствола орудия артиллерийского снаряда и сопровождающая этот процесс вспышка.

Жан Батист Перрен (*Jean Baptiste Perrin*; 1870–1942) – французский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1926 г. «за работу по дискретной природе материи и, в особенности, за открытие седиментационного равновесия». Такое равновесие наступает, когда сила сопротивления среды F уравнивает силу тяжести P , действующую на частицу, и после этого момента частица движется с постоянной *скоростью седиментации*.

Перрен посещал *École Normale Supérieure* в городе Лилле. В период с 1894 по 1897 г. он был там ассистентом и занялся изучением катодных и рентгеновских лучей. В 1897 г. ему была присуждена степень доктора наук по диссертации о катодных и рентгеновских лучах. В том же году он стал читать лекции в Сорбонском университете. В 1910 г. Перрен стал профессором и оставался на этом посту до оккупации немецкими войсками во время Второй мировой войны.

В 1895 г. Перрен показал, что катодные лучи имеют корпускулярную природу и отрицательный электрический заряд. Также Перрен определил значение числа Авогадро несколькими методами. Он объяснил источник солнечной энергии термоядерными реакциями с участием водорода.

После теоретической работы Эйнштейна 1905 г. об атомарной природе броуновского движения Перрен поставил эксперимент по проверке этой теории, положив конец столетней дискуссии об атомной теории Дж. Дальтона. В 1926 г. Ж. Перрен получает Нобелевскую премию по физике.



2.4.2. Опыты Дж. Дж. Томсона

Требовалось экспериментально доказать, что выброс катодом заряженных частиц и свечение стенки разрядной трубки взаимосвязаны, что речь идет не о разных физических явлениях, а об одном. Эти доказательства и были представлены **Дж. Дж. Томсоном** в его опытах 1897 г., являвшихся усовершенствованными вариантами опытов Перрена.

Цилиндр с отверстием располагался не перед катодом, а сбоку от него, для чего была изменена геометрия самой трубки (рис. 2.7).

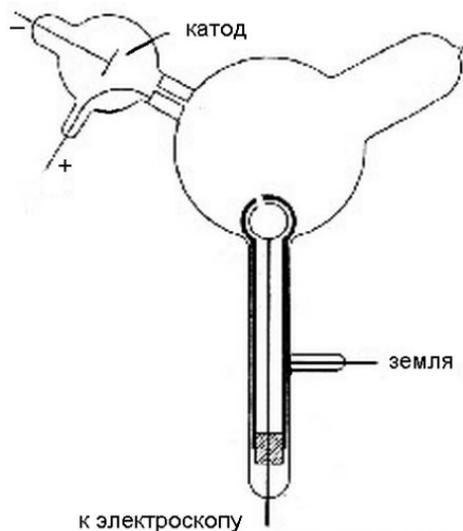


Рис. 2.7. Схема опыта Дж. Дж. Томсона

В этом случае изначально наблюдалась флуоресценция стеклянной стенки трубки, но она исчезала, когда катодные лучи отклоняли магнитом и «уводили» в отверстие цилиндра, связанного с электроскопом, который регистрировал отрицательный заряд. Так было доказано, что свечение стенки трубки и зарядку цилиндра вызывают одни и те же частицы. Кроме того, Томсон в своих опытах сумел сделать то, что не удалось сделать Герцу: он сумел добиться отклонения катодных лучей электрическим полем (в опытах Герца все портила проводимость остаточного газа в трубке, возникавшая под действием катодных лучей).

В результате Дж. Дж. Томсону по отклонению в электрическом и магнитном полях (подробнее о движении частиц в электрическом и магнитном полях будет рассказано ниже) удалось определить отношение заряда к массе, e/m (так называемый *удельный заряд*), отдельного «атома электричества».

Одновременно по отношению магнитного и электрического полей, которые одинаково отклоняют заряженные частицы, была измерена и скорость катодных лучей. Она оказалась равной примерно одной десятой скорости света, то есть в 30 000 раз больше скорости ружейной пули или скорости теплового движения атомов.

Выразив массу этих частиц в граммах, а заряд в единицах СГСМ, как это было принято в те времена, Томсон получил удельный заряд частиц рав-

ным $1,7 \cdot 10^7$ ед. СГСМ/г. О высокой точности его эксперимента говорит современное значение удельного заряда электрона, которое сейчас известно с точностью в 10 значащих цифр. Вот первые из них: $1,758 \cdot 10^7$ ед. СГСМ/г.

Сэр Джозеф Джон Томсон (*Joseph John Thomson*; 1856–1940) – английский физик, основатель научной школы, член (1884) и президент (1915–1920) Лондонского королевского общества, иностранный член-корреспондент Петербургской Академии наук (1913) и иностранный почетный член (1925) АН СССР. Лауреат Нобелевской премии по физике 1906 г. «за исследования прохождения электричества через газы».

Родился в 1856 г. в Читем-Хилле, вблизи Манчестера. Изучал физику в лаборатории Бальфура Стюарта в Оуэнс-колледже в Манчестере, затем в 1876 г. выиграл стипендию на обучение в Кембридже, где проучился до 1880 г. С 1882 г. – лектор по математике в Тринити-колледже (Кембридж). В 1882 г. удостоен премии Адамса за сочинение о движении вихрей (“*Treatise on the motion of vortex rings*”). С 1884 г. заместил Рэля, став директором Кавендишской лаборатории (1884–1919) при Кембриджском университете. Исследовал прохождение электрического тока через разреженные газы. Открыл (1897) электрон и определил (1898) его заряд. Предложил (1903) одну из первых моделей атома. Один из создателей электронной теории металлов.



Выводы, к которым Дж. Дж. Томсон пришел в результате эксперимента, были поразительны. Во-первых, было доказано, что катодные лучи – действительно частицы, которые летят в трубке с огромными скоростями, близкими к световым. А во-вторых, электрический заряд, приходившийся на единицу массы корпускул (*удельный заряд*), был фантастически большим: почти в 2 000 раз больше известного тогда значения удельного заряда иона водорода, равного 10^4 ед. СГСМ/г. Что же это были за частицы: неизвестные атомы, несущие на себе огромные электрические заряды, или крохотные частицы с ничтожной массой, но зато с меньшим зарядом?

Кроме этого, он обнаружил, что величина удельного заряда частиц есть величина постоянная, не зависящая ни от их скорости, ни от материала катода, ни от природы газа, в котором происходит разряд. Было похоже, что корпускулы являются какими-то универсальными частицами вещества, то есть составными частями атомов.

«После длительного обсуждения экспериментов, – пишет в своих воспоминаниях Томсон, – оказалось, что мне не избежать следующих заключений:

1. Что атомы не неделимы, так как из них могут быть вырваны отрицательно заряженные частицы под действием электрических сил, удара быстро движущихся частиц, ультрафиолетового света или тепла.

2. Что эти частицы все одинаковой массы, несут одинаковый заряд отрицательного электричества, от какого бы рода атомов они ни происходили, и являются компонентами всех атомов.

3. Масса этих частиц меньше, чем одна тысячная массы атома водорода. Я вначале назвал эти частицы корпускулами, но они теперь называются более подходящим именем „электрон“».

Термин «электрон» к тому времени уже существовал, его ввел в обиход в 1891 г. ирландский физик и математик Джордж Джонстон Стони (1826–1911) для обозначения электрического заряда одновалентного иона при электролизе, а после исследований Томсона этот термин был перенесен на открытые им частицы.

29 апреля 1897 г. в помещении, где уже более двухсот лет происходили заседания Лондонского королевского общества, состоялся его доклад. Важность этого доклада для присутствовавших состояла вовсе не в том, что коллега Дж. Дж. Томсон столь убедительно раскрыл истинную природу катодных лучей. Дело обстояло гораздо серьезнее.

Атомы, фундаментальные кирпичики материи, перестали быть элементарными, непроницаемыми и неделимыми частицами без всякого внутреннего строения. Если из них могли вылетать отрицательно заряженные корпускулы, значит, и представлять собой атомы должны были сложную систему, состоящую из чего-то заряженного положительным электричеством и из отрицательно заряженных корпускул – электронов.

Стали видны и дальнейшие, необходимые направления будущих поисков. Прежде всего необходимо было определить точно заряд и массу одного электрона.

К выводу о том, что электрон имеет небольшую массу, Томсон пришел из следующих соображений. Чтобы объяснить огромное значение удельного заряда электрона, необходимо предположить либо его очень малую массу при небольших зарядах, либо очень большой заряд при массах порядка атомных.

Имеется два предельных случая.

а) Если предположить, что масса электрона равна массе иона водорода, тогда заряд электрона должен быть больше, чем заряд иона водорода, почти в 2 000 раз. Однако исследования немецкого физика Филиппа Ленарда показали нереальность подобного предположения. Им было установлено, что средний свободный пробег частиц, образующих катодные лучи, составляет в воздухе 0,5 см, в то время как для иона водорода он меньше, чем 10^{-5} см. Значит, масса вновь открытых частиц должна быть малой.

б) Если заряд частицы равен заряду иона водорода, то в таком случае масса данной частицы должна быть меньше массы иона водорода приблизительно в 2 000 раз. На этом варианте и остановился Томсон.

Точно к таким же выводам, даже несколько раньше Дж. Дж. Томсона, в январе 1897 г., независимо пришел **Эмиль Вихерт**.

Эмиль Иоганн Вихерт (*Johann Emil Wiechert*; 1861–1928) – немецкий геофизик.

Вихерт родился в прусской провинции Тильзит. После смерти отца мать с сыном переехали в Кенигсберг (теперь Калининград), для того чтобы Вихерт мог учиться в университете.

В 1889 г. Вихерт защитил докторскую диссертацию. На следующий год он получил право читать лекции по физике. До 1897 г. преподавал и проводил исследования в Кенигсбергском университете. С 1898 г. – доцент геофизики в университете Геттингена, директор Геофизической лаборатории. В 1905 г. стал профессором и проработал в лаборатории до конца карьеры.

Вихерт внес значительный вклад в открытие электрона, физику катодных лучей, известен в паре с Альфредом-Мари Лиенаром по выражению для потенциала электромагнитного поля, названного их именем (потенциалы Лиенара – Вихерта). Автор многих работ, в том числе по исследованию сейсмических волн.



История науки знает немало примеров, когда двое (а порой и больше) исследователей делали одно и то же открытие независимо и практически одновременно, но кому-то из них удавалось первому сообщить о полученных результатах. Обычно ему и приписывался приоритет открытия.

Что касается истории электрона, то проблема приоритета в данном случае по существу не обсуждалась. При скрупулезном подходе первенство должно было бы принадлежать Вихерту. В докладе на заседании Физико-экономического общества в Кенигсберге 7 января 1897 г. он заявил, что проделанные им опыты с катодными лучами свидетельствуют о существовании электрических зарядов, которые обладают конечной массой. Вихерт говорил: «...мы должны задаться вопросом, какого рода эти электрические частички, идет ли здесь речь об известных химических атомах или атомных группах, или же о телах иного рода... Исследование показало, что мы имеем дело не с атомами, известными из химии, потому что масса движущихся частиц оказалась в 2 000–4 000 раз меньше, чем у атома водорода, то есть легчайшего из химических атомов».

Позднее Вихерт уточнил массу частицы (1/1 000–1/2 000 массы водородного атома). Это значение близко к истинному. В 1898 г. Вихерт заметил, что Томсон пришел к выводам «об особых электрических атомах... совершенно аналогичным тем, которые я сделал несколькими месяцами ранее». Впоследствии к вопросу о перипетиях открытия электрона Вихерт не возвращался.

Спустя сорок лет Томсон вернулся к истории электрона. Он вспоминал, например, что первое сообщение об электроне сделал 29 апреля 1897; 21 мая оно было опубликовано; полный же текст статьи «Катодные лучи» увидел свет в октябре. Примечателен комментарий Томсона: «Примерно в то же время другие исследования величины m/e были опубликованы Э. Вихертом... чьи результаты довольно хорошо согласовывались с моими...»

Однако, по мнению Томсона, сама мысль о существовании частиц, более легких, чем атомы, вызывала недоверие физиков, нужны были более серьезные доказательства. Поэтому в ходе экспериментов 1898 г. он измерил заряд электрона, хоть и с не очень высокой точностью, но достаточной, чтобы прийти к окончательному выводу, что большое значение e/m обуславливается малостью массы, а не большой величиной заряда.

Дж. Дж. Томсон на протяжении по крайней мере трети двадцатого столетия почти все свое время отдавал изучению электрона. Это обстоятельство и объясняет, почему в современных описаниях истории открытия первой элементарной частицы имя Вихерта часто не упоминается. Правда, слово «открытие» здесь выглядит неточным, правильнее было бы сказать «окончательное доказательство существования».

Величайшая заслуга Томсона состоит в том, что он отчетливо увидел в электроне один из структурных кирпичиков материи: «Таким образом, катодные лучи представляют собой новое состояние вещества, отличное от обычного газообразного состояния... в этом новом состоянии материя представляет собой вещество, из которого построены все химические элементы».

Вывод о существовании электрона стал одним из величайших научных событий конца XIX в. Именно электрон оказался сильнейшим стимулом к разработке моделей строения атомов, положил начало теориям химической связи. Закономерности формирования электронных конфигураций атомов по мере роста зарядов их ядер легли в основу объяснения периодичности свойств элементов.

Идея о «дуализме» волновых и корпускулярных свойств электрона способствовала разработке фундаментальных основ квантовой механики, а электрон как объект теоретического изучения и, одновременно, как инструмент для исследования вещества и фундаментальных свойств материи занял одно из центральных мест в науке XX в.

Однако окончательное доказательство существования элементарного электрического заряда было получено в опытах американского физика **Роберта Милликена**, которые он выполнил в 1909–1912 гг. В этих опытах было установлено, что все заряды являются кратными некоторому элементарному заряду, который переносит электрон, и этот заряд был точно измерен.

Роберт Эндрюс Милликен (*Robert Andrews Millikan*; 1868 – 1953) – американский физик. В 1923 г. получил Нобелевскую премию по физике «за работы по фотоэффекту и измерению заряда электрона». Впоследствии занимался изучением космических лучей.

Милликен родился в семье священника. Перед поступлением в Оберлинский колледж в Огайо работал репортером. В 1891 г. получил степень бакалавра по классике – языку, философии, истории и искусству древнего Средиземноморья. В 1896 г. получил степень доктора по физике в Колумбийском университете. Сам он так объяснил столь разительную смену темы изучения: «В последний год обучения мой профессор по греческому попросил меня прочесть курс по элементарной физике в подготовительном отделении... На мой ответ, что я ничего не знаю из физики, он ответил: «Любой, кто смог получить у меня хорошую отметку по греческому, может преподавать физику». «Хорошо, – ответил я, – под вашу ответственность я попробую и посмотрю, что из этого получится». Сразу после этого я купил книгу Эвери «Начала физики» и провел большую часть летних каникул 1889 года дома, пытаясь вникнуть в предмет... Сомневаюсь, преподавал ли я лучше когда-либо в моей жизни, чем тогда в 1889 году. Я был настолько заинтересован в том, чтобы знать больше, чем мои ученики, что они, наверно, подхватили часть моего интереса и энтузиазма».

После завершения обучения Милликен преподавал в различных местах, в том числе один год проработал в университетах Берлина и Геттингена. В 1896 г. возвращается в США, где становится ассистентом профессора физики, а затем и профессором физики в Чикагском университете.



2.5. Измерение элементарного заряда

2.5.1. Идея метода измерения зарядов ионизированных молекул

Первые определения заряда иона начались в Кавендишской лаборатории в Кембридже. Начало было положено работами Дж. Дж. Томсона 1898 г., в которых физик использовал наблюдение, сделанное в 1897 г. Чарльзом Томсоном Рисом Вильсоном (тогда его студентом, а впоследствии

автором знаменитой камеры Вильсона), что ионы являются центрами конденсации водяных паров.

Отступление. Ч. Т. Р. Вильсон вернулся к работе по конденсации в 1910 г., чтобы использовать камеру для регистрации пролетающих внутри заряженных частиц. Своим зарядом альфа- и бета-частицы на своем пути ионизируют молекулы газа. Он догадался, что водяной пар, конденсирующийся вокруг ионизированных молекул, должен образовывать следы, которые можно фиксировать на фотоэмульсии. Приспособив камеру для этой цели, в 1911 г. Вильсон сообщил, что видел «восхитительные облачные следы», сконденсировавшиеся вдоль треков альфа- и бета-частиц. Фотографии треков, сделанные им, произвели глубокое впечатление в научном мире. Они служили зримым свидетельством частиц, чье существование ранее устанавливалось лишь косвенно, причем частицы можно было отличать друг от друга с невероятной четкостью. В 1927 г. Ч. Т. Р. Вильсон был удостоен Нобелевской премии по физике «за метод визуального обнаружения траекторий электрически заряженных частиц с помощью конденсации пара».

Наблюдая движение облака ионизированных водяных паров в электрическом поле, Томсон получил для элементарного заряда иона значение

$$q = (6,5-6,7) \cdot 10^{-10} \text{ абс. эл.-ст. ед.}$$

В 1901–1902 гг. физик повторил опыты, усовершенствовал установку. Здесь он получил значение

$$q = 3,4 \cdot 10^{-10} \text{ абс. эл.-ст. ед.}$$

В 1903 г. опыты по определению q предпринял другой Вильсон – ассистент Томсона, также бывший его студент, – Г. А. Вильсон.

Вот краткое описание его метода, сделанное Дж. Дж. Томсоном в своей книге: «Г. А. Вильсон определил заряд иона следующим образом: он получал облако ионизированного тумана такое, что все капли были наэлектризованы отрицательно; он затем наблюдал скорость падения этого облака в электрическом поле (а также и в отсутствие поля), причем электрическая сила была направлена вертикально...»

После многих попыток провести это решающее измерение, через десять лет работы, Г. Вильсон сообщил, что после одиннадцати различных измерений они получили одиннадцать различных результатов.

Эти измерения базировались на следующих соображениях. Если поля нет, то капельки в поле тяжести будут опускаться с постоянной скоростью вследствие сопротивления воздуха. Капелька наблюдается в микроскоп. Скорость ее опускания определяется по пути, проходимому в поле микроскопа за измеряемое время. Величина скорости зависит от силы, действующей на каплю. По закону Стокса на шар радиуса r , движущийся со скоростью v_g в непрерывной среде, обладающей коэффициентом трения η ,

действует сила сопротивления среды F (сила вязкого трения, или сила Стокса):

$$F = 6\pi r\eta v_g.$$

Если частицы падают в вязкой среде под действием собственного веса, то установившаяся скорость достигается, когда эта сила трения вместе с выталкивающей силой Архимеда точно уравновешиваются силой гравитации:

$$6\pi r\eta v_g = \frac{4\pi r^3}{3} g(\rho_p - \rho_f).$$

Так что

$$v_g = \frac{2}{9} \frac{r^2}{\eta} g \Delta\rho.$$

Здесь g – ускорение свободного падения (м/с^2); ρ_p – плотность частиц; ρ_f – плотность жидкости (кг/м^3); v_g – установившаяся скорость частицы; частица движется вниз, если $\Delta\rho = \rho_p - \rho_f > 0$ ($\rho_p > \rho_f$), и вверх в случае $\Delta\rho < 0$ ($\rho_p < \rho_f$).

Если частица обладает электрическим зарядом q и находится в электрическом поле E , направленном противоположно силе тяжести, то скорость частицы определится из условия

$$6\pi r\eta v = \frac{4\pi r^3}{3} g \Delta\rho - qE.$$

Результирующая скорость будет равна

$$v = v_g - \frac{qE}{6\pi r\eta}.$$

Таким образом, измеряя v для разных значений E , мы можем получить r и q . Этим методом Г. Вильсон и пытался измерить величину минимального (элементарного) заряда. Однако он наблюдал не отдельные капельки, а облако тумана, состоявшего из таких капелек, которые имели еще и разные размеры, и пытался электрическим полем уравновесить все облако. Различные результаты он получал, потому что капельки воды (в облаке) довольно быстро испаряются, причем по-разному (время испарения существенно зависит от их размера), их масса (и сила тяжести) падает, в результате их равновесное движение нестабильно, они выталкиваются электрическим полем из поля зрения микроскопа.

2.5.2. *Опыты Милликена*

Тем не менее именно этот метод в его развитии и привел к точному определению элементарного электрического заряда. Дискретность и величина элементарного электрического заряда впервые были четко доказаны в опытах Милликена (1909). Милликен нашел новый путь решения проблемы. Дело было не в аппарате, а в том, как им пользоваться. Он внес в его конструкцию ряд небольших изменений, которые «впервые позволили провести все измерения на одной и той же отдельной капельке». Вот как он сам описывает свои опыты: «...В качестве первого шага в области усовершенствования я в 1906 году сконструировал небольшую по габаритам батарею на 10 тысяч вольт (что само по себе было в то время немалым достижением), которая создавала поле, достаточно сильное для того, чтобы удерживать верхнюю поверхность облака Вильсона в подвешенном, как «гроб Магомета», состоянии. Когда у меня все было готово и когда образовалось облако, я повернул выключатель, и облако оказалось в электрическом поле. В то же мгновение оно на моих глазах растаяло, другими словами – от целого облака не осталось и маленького кусочка, который можно было бы наблюдать при помощи контрольного оптического прибора, как это делал Вильсон и собирался сделать я. Как мне сначала показалось, бесследное исчезновение облака в электрическом поле между верхней и нижней пластинами означало, что эксперимент закончился безрезультатно... Однако, повторив опыт, я решил, что это явление гораздо более важное, чем я предполагал. Повторные опыты показали, что после рассеивания облака в мощном электрическом поле на его месте можно было различить несколько отдельных водяных капель...»

Создавая мощное электрическое поле, Милликен неизменно рассеивал облако. От него оставалось очень небольшое число частиц, масса и электрический заряд которых находились в идеальном равновесии. На самом деле именно те капли, которые были теперь удалены из камеры, нарушали все предшествовавшие измерения.

«...Я наблюдал при помощи моего короткофокусного телескопа за поведением этих находящихся в равновесии капелек в электрическом поле. Некоторые из них начинали медленно двигаться вниз, а затем постепенно теряли вес в результате испарения, останавливались, поворачивались... и медленно начинали двигаться вверх, так как сила тяжести все уменьшалась вследствие испарения... Если электрическое поле внезапно исчезало, все находящиеся в равновесии капельки, похожие на звездочки на темном поле, начинали падать – одни медленно, другие гораздо быстрее. Эти последние капельки оказались во взвешенном состоянии потому, что они несли на себе

два, три, четыре, пять и больше электронов вместо одного... Это было, наконец, первое отчетливое, ясное и недвусмысленное доказательство того, что электричество едино по структуре».

Это последнее наблюдение было в то время фактически значительно более важным, чем измерение заряда электрона.

Милликен закончил первые измерения заряда электрона в сентябре 1909 г. и незамедлительно выступил с сообщением на совещании Британской ассоциации содействия науке в Виннипеге. Хотя его имени не было в списке докладчиков, ему дали возможность выступить. Правда, он не питал никаких иллюзий, хорошо понимая, что результаты его опытов являются лишь предварительными и что с помощью более совершенных в техническом отношении приборов могут быть получены более точные данные.

«...Возвращаясь в Чикаго с этого совещания, я смотрел из окна моей почтовой кареты на равнины Манитобы и внезапно сказал себе: какой глупец! Попытаться таким грубым способом прекратить испарение воды в водяных капельках в то время, как человечество затратило последние триста лет на усовершенствование масла для смазки часов, стремясь получить смазочное вещество, которое вообще не испаряется!

Когда я вернулся в Чикаго, у входа в лабораторию я встретил Майкельсона. Мы уселись на пороге и начали болтать. Я спросил его, насколько, по его мнению, точно измерил он скорость света. Он ответил, что измерение произведено с точностью примерно до одной десятичной. «Так вот – сказал я, – я придумал метод, при помощи которого я смогу определить величину заряда электрона с точностью до одной тысячной, или грош мне цена».

Я немедленно направился в мастерскую и попросил механика изготовить воздушный конденсатор, состоящий из двух круглых латунных пластин около 10 дюймов в диаметре, которые были бы закреплены на расстоянии примерно шести десятых дюйма одна от другой. В центре верхней пластины было просверлено несколько полумиллиметровых отверстий, сквозь которые капельки смазочного масла, поступающие из распылителя, могли бы попасть в пространство между пластинами. К пластинам были подключены выводы моей батареи на 10 тысяч вольт...»

Милликен намеревался изменять заряд капельки масла при помощи потока рентгеновских лучей, как он делал это раньше с водой.

Если, например, при образовании капли на ней возникает электрический заряд q , при облучении капли рентгеновскими лучами ее заряд меняется и становится равным q_r . Скорость капли в том же электрическом поле также изменяется и становится v_r . Заряд изменяется на величину $\Delta q = q_r - q$. Эта величина связана с изменением скорости $\Delta v = v_r - v$ следующим образом:

$$\Delta q = -\frac{\Delta V}{E} 6\pi r \eta.$$

Отношение зарядов определяется как

$$\frac{q}{q_r} = \frac{v_g - v}{v_g - v_r}.$$

Если заряд имеет дискретную природу, то это отношение должно равняться отношению небольших целых чисел, а изменение заряда должно быть кратно некоторой величине.

Опыт показал, что:

а) при перезарядке заряд капли меняется на целое число величины $4,8 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ заряда;

б) заряд капли кратен той же величине. Тем самым были доказаны дискретность изменения и атомизм электрического заряда.

Вернемся к описанию самого Милликена: «Меня зачаровывала та абсолютная уверенность, с которой можно было точно пересчитать количество электронов, сидевших на данной капле, будь это один электрон или любое их число, до сотни включительно. Для этого требовалось лишь заставить исследуемую каплю проделать большую серию перемещений вверх и вниз, точно измерив время, потраченное ею на каждое перемещение, а затем высчитать наименьшее общее кратное довольно большой серии скоростей».

Милликен опубликовал результаты своих опытов осенью 1910 г. и оказался в центре внимания физиков всего мира.

2.5.3. *Опыты Иоффе*

В 1911 г. **А. Ф. Иоффе** в своей работе, составившей предмет его магистерской диссертации под названием «Элементарный фотоэлектрический эффект», также определил заряд электрона. Он использовал ту же идею, что и Р. Милликен: в электрическом и гравитационном полях уравновешивались заряженные частицы металла (капельки ртути или пылинки цинка, которые, можно считать, совсем не испаряются).

Приведем выдержку из представления к избранию профессора А. Ф. Иоффе в действительные члены Российской академии наук по кафедре физики, подписанного академиками А. П. Карпинским, А. А. Белопольским, В. А. Стекловым, А. Н. Крыловым, П. П. Лазаревым: «При освещении ультрафиолетовыми лучами оказалось, что по временам пылинки внезапно приходила в движение, и необходимо было менять поле, чтобы ее вновь уравновесить. Изменение напряженности поля давало возможность судить об изменении заряда пылинки. Опыт показал, что этот заряд не изменяется посте-

пенно и непрерывно, принимая любое значение, а, напротив того, изменяется скачками, причём каждый раз уносится целое кратное одного и того же количества электричества.

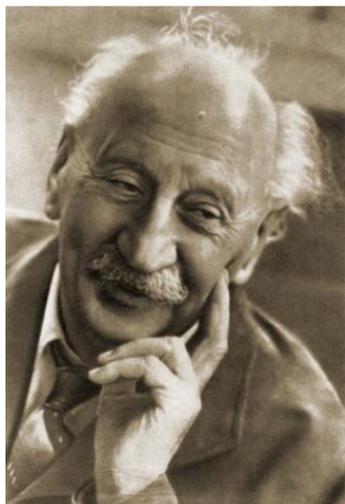
Меняя силу поля, Абрам Федорович вполне управлял движением пылинки, им избранной; он мог перемещать ее в любое место камеры своего прибора и, подвергая ее действию лучей радия, вновь сообщать ей утраченный заряд и проследивать ход явления в обратном предыдущему порядке; таким образом он установил, что и нарастание заряда идет порционно такими же количествами, как и потеря его, и, значит, подтвердил атомное строение электрического заряда...

По картинному описанию лорда Кельвина, атом водорода во столько же раз меньше баллотировочных шариков, во сколько раз этот шарик меньше земного шара, – так вот электрон еще в 2 000 раз меньше атома водорода. Абрам же Федорович с ясностью улавливал выделение одного, двух, трех и т. д. электронов, и притом именно одного, именно двух и т. д., а не какого-либо иного [дробного] их числа.

Этой работой индивидуальное существование электрона, независимо от материи, и притом с зарядами постоянной величины, независимо от его происхождения, было доказано с той степенью несомненности, с какой вообще можно считать доказательным явление, устанавливаемое прямым опытом и затем истолковываемое.

Не ограничиваясь этим, Абрам Федорович определил и абсолютную величину заряда и исследовал магнитные действия катодных лучей, представляющих поток электронов; это потребовало также весьма тщательной и тонкой постановки опытов, которая не удавалась другим ученым».

Однако эту работу Иоффе опубликовал в 1913 г. (Милликен опубликовал свой результат раньше, поэтому в мировой литературе эксперимент получил его имя.)



A handwritten signature in cursive script, likely reading 'А. Ф. Иоффе'.

Абрам Федорович Иоффе (1880–1960) – российский и советский физик, организатор науки, заслуженно именуемый «отцом советской физики», академик (1920), вице-президент Академии наук СССР (1942–1945).

Иоффе также был членом многих других академий наук: Геттингенской (1924), Берлинской (1928), Американской академии наук и искусств (1929), почетным членом АН Германии «Леопольдина» (1958), Итальянской АН (1959), почетным доктором Калифорнийского университета (1928), Сорбонны (1945), университетов Граца (1948), Бухареста и Мюнхена (1955).

В 1918 г. создал и возглавил физико-технический отдел при Государственном рентгенологическом и радиологическом институте, являясь также президентом этого института (директором был профессор М. И. Неменов). В 1921 г. стал директором Физико-технического института АН СССР, созданного на основе этого отдела (ныне –

ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН). В 1919–1923 гг. – председатель Научно-технического комитета петроградской промышленности, в 1924–1930 гг. – председатель Всероссийской ассоциации физиков, с 1932 г. – директор Агрофизического института.

В начале Великой Отечественной войны был назначен председателем Комиссии по военной технике, в 1942 г. – председателем военной и военно-инженерной комиссии при Ленинградском горкоме партии.

В декабре 1950 г., во время кампании по «борьбе с космополитизмом», Иоффе был снят с поста директора ФТИ и выведен из состава ученого совета института. В 1952 г. возглавил лабораторию полупроводников АН СССР. В 1954 г. на основе лаборатории был организован Институт полупроводников АН СССР.

Автор работ по экспериментальному обоснованию теории света (1909–1913), физике твердого тела, диэлектрикам и полупроводникам. Иоффе был редактором многих научных журналов, автором ряда монографий, учебников и популярных книг, в том числе «Основных представлений современной физики» (1949), «Физики полупроводников» (1957) и др.

Крупнейшей заслугой А. Ф. Иоффе является основание уникальной физической школы. Первым этапом этой деятельности была организация в 1916 г. семинара по физике. К участию в своем семинаре Иоффе привлек молодых ученых из Политехнического института и Петербургского университета, которые вскоре стали его ближайшими соратниками при организации Физико-технического института. По инициативе Иоффе, начиная с 1929 г., были созданы физико-технические институты в крупных промышленных городах: Харькове, Днепропетровске, Свердловске и Томске.

Под руководством А. Ф. Иоффе начинали свою научную деятельность будущие нобелевские лауреаты П. Л. Капица, Н. Н. Семенов, Л. Д. Ландау, работали крупнейшие ученые А. П. Александров, А. И. Алиханов, Л. А. Арцимович,

М. П. Бронштейн, Я. Г. Дорфман, Я. Б. Зельдович, И. К. Кикоин, Б. П. Константинов, И. В. Курчатов, И. Е. Тамм (также будущий лауреат Нобелевской премии), Я. И. Френкель, Ю. Б. Харитон и многие другие.

Его именем был назван кратер Иоффе на Луне и научно-исследовательское судно «Академик Иоффе».

2.6. Открытие X-лучей (лучи Рентгена)

Немецкий физик Ф. Ленард показал, что катодные лучи могут проникать сквозь окошко в трубке, затянутое тонкой алюминиевой фольгой, и ионизовать воздух в непосредственной близости окошка.

Вильгельм Конрад Рентген повторил некоторые из более ранних экспериментов, в частности показав, что исходящие из окошка Ленарда катодные лучи вызывают свечение (флуоресценцию) экрана, покрытого цианоплатинатом бария, расположенного за окошком.

Вильгельм Конрад Рентген (*Wilhelm Conrad Roentgen*; 1845–1923) – немецкий физик. Первый в истории лауреат Нобелевской премии по физике (1901) «за открытие замечательных лучей, часто называемых его именем».



Однажды (это случилось 8 ноября 1895 г.) Рентген, чтобы облегчить наблюдения, затемнил комнату и обернул трубку Крукса (без окошка Ленарда) плотной непрозрачной черной бумагой. К своему удивлению, он увидел на стоявшем неподалеку экране, покрытом цианоплатинатом бария, полосу флуоресценции. Детально проанализировав результат и исключив возможные ошибки, он установил, что флуоресценция появлялась всякий раз, когда он включал трубку, что источником излучения является именно зеленое светящееся пятно на трубке (а не какая-либо другая часть цепи) и что экран флуоресцировал на расстоянии даже почти двух метров от трубки, куда, как было известно, катодные лучи не могли проникнуть (рис. 2.8).

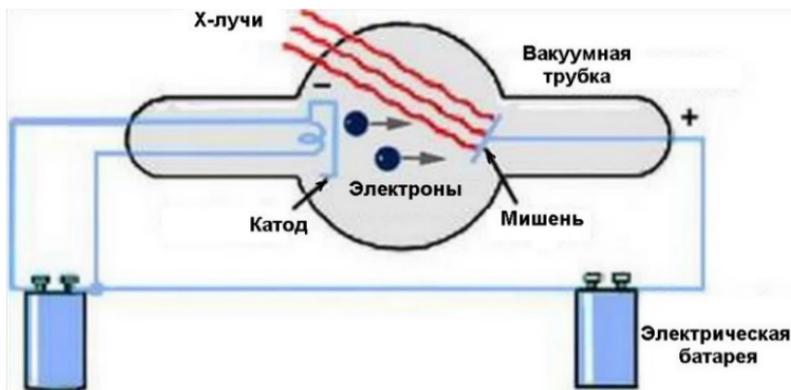


Рис. 2.8. Схема опыта Рентгена

В декабре 1895 г. Вильгельм Конрад Рентген сообщил об открытии нового вида лучей, которые он назвал *X*-лучами. До сих пор в большинстве стран они так и называются, но в Германии и России принято предложение немецкого биолога Рудольфа Альберта фон Кёлликера (1817–1905) называть лучи рентгеновскими.

Вскоре Рентген обнаружил, что излучение проходит через многие непрозрачные вещества, вызывает почернение фотопластинки, завернутой в черную бумагу или даже помещенной в металлический футляр. Лучи проходили через очень толстую книгу, через еловую доску толщиной 3 см, через алюминиевую пластину толщиной 1,5 см... Рентген понял возможности своего открытия: «Если держать руку между разрядной трубкой и экраном, – писал он, – то видны темные тени костей на фоне более светлых очертаний руки» (см. рис. 2.9). Это было первое в истории рентгеноскопическое исследование.

Эксперименты Рентгена показали, что *X*-лучи возникают в месте столкновения катодных лучей с преградой внутри катодной трубки. Он сделал трубку специальной конструкции: антикатод был плоским, что обеспечивало интенсивный поток *X*-лучей. Благодаря этой трубке (она впоследствии будет названа рентгеновской) он изучил и описал основные свойства ранее неизвестного излучения.

К Рентгену не раз обращались представители промышленных фирм с предложениями о выгодной покупке прав на использование изобретения. Но Вильгельм отказался запатентовать открытие, так как не считал свои исследования источником дохода.



Рис. 2.9. Снимок руки супруги Рентгена с обручальным кольцом на пальце, сделанный им в рентгеновских лучах

По-видимому, первым открытие Рентгена в коммерческих целях применил Т. Эдисон: в мае 1896 г. он в Нью-Йорке организовал выставку, где желающие могли разглядывать на экране изображение своих конечностей, и не только, в рентгеновских лучах (рис. 2.10). Но после того как его помощник умер от ожогов X-лучами, Эдисон прекратил все опыты с ними. Однако, несмотря на очевидную опасность, работы с новыми лучами, расширяясь и углубляясь, продолжались.

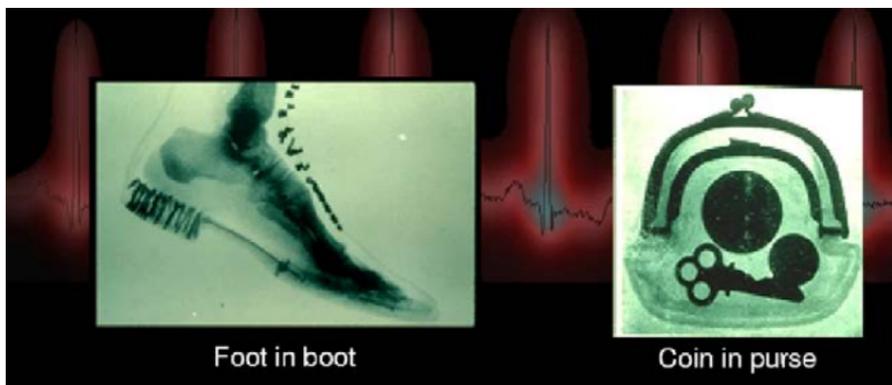
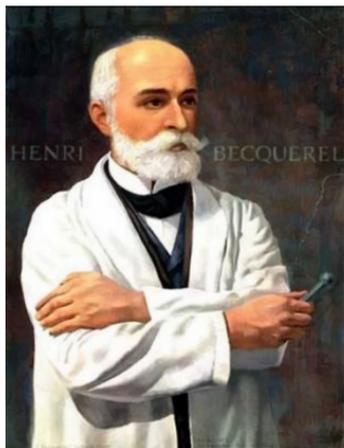


Рис. 2.10. Рентгеновские снимки ступни (слева) и кошелька (справа), сделанные Т. Эдисоном

К 1919 г. рентгеновские трубки получили широкое распространение и применялись во многих странах. Благодаря им появились новые направления науки и техники: рентгенология, рентгенодиагностика, рентгенометрия, рентгеноструктурный анализ и др.

2.7. Радиоактивность

В начале 1896 г. **Анри Беккерель** обнаружил, что соли урана испускают проникающее излучение (урановые лучи). Он установил, что это явление целиком **связано с присутствием урана**, который стал **первым открытым радиоактивным химическим элементом**.



Антуан Анри Беккерель (*Antoine Henri Becquerel*; 1852–1908) родился в Париже в семье потомственных физиков. Дом, в котором он родился, принадлежал Национальному музею естественной истории. Здесь прошла жизнь двух поколений знаменитой семьи Беккерелей и началась жизнь третьего поколения этой династии физиков. Родоначальником этой славной династии был дед, Антуан Сезар Беккерель (1788–1878), профессор, член Парижской академии наук. Летом 1835 г. в Венеции Антуан Сезар Беккерель наблюдал сказочную по красоте фосфоресценцию Адриатического моря. С этого момента он, первый из семьи Беккерелей, заинтересовался проблемой фосфоресценции – свечения, продолжающегося после прекращения действия падающего света.

Термин «радиоактивность» был предложен **Марией Кюри**, одной из первых начавшей исследования этого природного явления.

Через два года Мария и Пьер Кюри обнаружили подобные свойства у *тория* и открыли два новых радиоактивных элемента – *полоний* и *радий*.

В 1903 г. была присуждена Нобелевская премия:

- Беккерелю – за открытие спонтанной радиоактивности;
- супругам Кюри – за исследование радиационных явлений, открытых профессором Анри Беккерелем.

После оказалось, что все химические элементы с $A > 82$ радиоактивны, а с появлением ускорителей и ядерных реакторов у *всех химических элементов* были обнаружены *радиоактивные изотопы*, которые в большинстве не встречаются в естественных условиях.

2.7.1. История открытия радиоактивности

История открытия явления радиоактивности вкратце такова. В 1896 г. **Анри Пуанкаре** выдвинул предположение, что X -лучи, открытые Рентгеном, могут самопроизвольно испускаться некоторыми природными фосфоресцирующими веществами (фосфоресценция отличается от флуоресценции длительностью – она не затухает мгновенно, после устранения возбудителя свечения, а продолжается некоторое время, поскольку фосфоресцирующие вещества запасают впрок большее количество энергии). Рассуждения Пуанкаре были логичны и просты: рентгеновское излучение, по-видимому, возникает на том конце вакуумной трубки, куда попадают катодные лучи и где светится стекло трубки. Но тогда, может быть, светящиеся (люминесцирующие) вещества могут и сами испускать лучи наподобие рентгеновских? И не сопровождается ли всегда флуоресценция, какова бы ни была причина, ее вызывающая, испусканием лучей Рентгена? Он высказал эту мысль на очередном заседании Парижской академии наук.

Доклад Пуанкаре произвел большое впечатление на Беккереля. У него была коллекция фосфоресцирующих веществ, собранная еще его отцом и дедом, и он решил провести эксперименты с солями урана. Фотопластинки заворачивались в непрозрачную для видимого света черную бумагу, поверх которой накладывалась медная фольга в форме креста. Поверх нее Беккерель помещал плоские кристаллики двойной сернокислрой соли урана и выставлял эту сборку на несколько часов на солнечный свет. После проявления на фотопластинке четко обозначились темные засвеченные площади соответствующих кристалликов, а на фоне этой засветки четко проступал контур креста. 24 февраля 1886 г. Беккерель на заседании Парижской академии наук поспешил объявить, что у такого сильно фосфоресцирующего вещества, как двойной сульфат уранила калия, выставленного на свет, наблюдается невидимое излучение, подобное рентгеновскому, проходящее сквозь черную бумагу и восстанавливающее соли серебра на фотопластинке. Идея Пуанкаре – подтверждена!!! Но Беккерель не делает окончательного заключения!

В последующие дни Беккерель усовершенствовал метод работы. Он сконструировал специальные рамки, обтянутые черным полотном, в которые могли помещаться фотопластинки. Вся подготовка к эксперименту была закончена уже к среде 26 февраля, однако как 26-го, так и 27 февраля стояла пасмурная погода. Наблюдения фосфоресценции без солнца были невозможны, и Беккерель спрятал приготовленные, но не подвергнутые освещению рамки с фотопластинками в ящик стола. Они пролежали там в полной темноте еще два дня. Наконец 1 марта погода улучшилась, и можно было начать эксперименты. Простая логика подсказывала: пластинки пролежали в темноте, и с ними ничего не могло произойти. Тем не менее, будучи тща-

тельным во всех мелочах, Беккерель решил до начала эксперимента проявить их, поскольку пластинки пролежали в контакте с солями урана несколько дней, а это могло нарушить идентичность проведения этих и предыдущих экспериментов. Именно эта научная щепетильность и привела его к открытию.

Беккерель проявил фотопластинки и увидел, что на них резко и четко обозначились силуэты образцов (рис. 2.11).

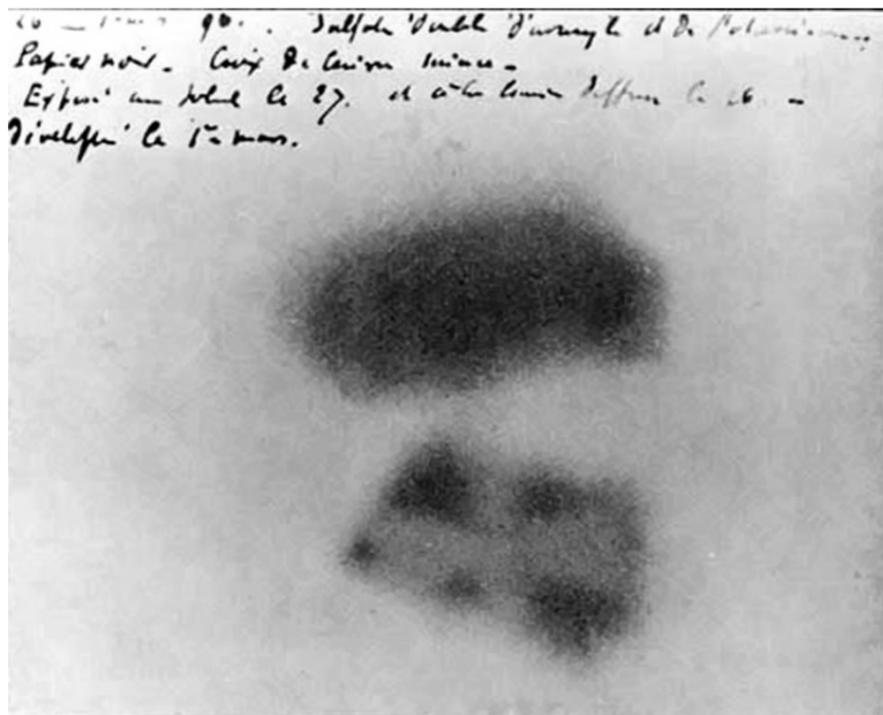


Рис. 2. 11. Изображение фотопластинки Беккереля, которая была засвечена излучением солей урана. Ясно видна тень металлического мальтийского креста, помещенного между пластинкой и солью урана

Практически в это же время английский физик Сильванус Томпсон проводил аналогичные эксперименты. Он заворачивал фотографические пластинки в черную бумагу, поверх накладывал металлические листочки, а на них – образцы различных минералов, в том числе куски уранового стекла и нитрат уранила. Следы обозначились на тех фотопластинках, на которых располагались образцы, содержащие уран. Томпсон пришел к выводу, что

эти вещества выделяют проникающее излучение, которое засвечивает пластинки. Видимо, считая, что излучение, ответственное за засветку, является рентгеновским, он заинтересовался вопросом несоответствия этого излучения закону Стокса. По этому закону свет, испускаемый при фосфоресценции, должен иметь большую длину волны и быть менее проникающим, чем возбуждающий. Томпсон написал об этом Стоксу, указывая на возможные недоработки открытой им закономерности. Стокс быстро откликнулся и обратил внимание С. Томпсона на важность его опытов с фотографическими пластинками. При этом он написал: «Боюсь, что вы уже опережены Беккерелем». Томпсон был опережен всего на три дня.

Таким образом, в конце XIX в. было установлено, что соли урана самопроизвольно, без предварительного воздействия на них света, испускают лучи неизвестного происхождения. Содержащее уран вещество, положенное на фотографическую пластинку, обернутую в черную бумагу, воздействует на фотопластинку, проходя через бумагу. Эти лучи способны разряжать электроскоп, превращая окружающий воздух в проводник электричества. Беккерель убедился, что эти свойства урана не зависят от предварительного облучения и проявляются даже тогда, когда урансодержащее вещество долго выдерживают в темноте. Именно он открыл то явление, которое впоследствии Мария Кюри назвала радиоактивностью.

2.7.2. Открытие новых радиоактивных элементов

Мария Склодовская-Кюри, делающая лишь первые шаги в науке, активно включилась в только-только зарождающуюся область исследований. Уже ее первый научный результат чрезвычайно интересен: интенсивность таинственного (рентгеновского?) излучения оказалась пропорциональна количеству урана в образцах, на характер излучения не влияли ни состав химических соединений урана, ни освещенность, ни температура. Похоже, что излучение имеет атомное происхождение – только так можно было объяснить данные опытов. Похожий радиационный эффект был обнаружен химиком **Эрхардом Шмидтом** и у соединений тория. Явление в целом получило название радиоактивности, а уран и торий были названы радиоактивными элементами (испускающими лучи). Дальнейшие исследования супругов **Марии и Пьера Кюри** показали, что некоторые минералы урана имеют активность гораздо более высокую, чем у урана и тория. Так готовилось открытие радия.

Для того чтобы точно измерить активность, Кюри применяют количественный метод измерения ионизации воздуха, производимой излучением урана в ионизационной камере. В дальнейшем этот же метод использовался супругами Кюри для сравнения активности различных радиоактивных ве-

ществ. Ионизационная камера представляла собой плоский конденсатор, который состоял из двух пластинок (назовем их *A* и *B*). Радиоактивное вещество в виде порошка размещалось на горизонтальной пластине *B*; благодаря своей ионизирующей способности оно делало воздух между пластинками проводящим. Напомним, что незадолго до этого характер проводимости газов, возникающей под действием рентгеновских лучей, был изучен Дж. Дж. Томсоном. Кюри для измерения проводимости, вызываемой излучением образцов, создавали постоянную разность потенциалов между этими пластинами конденсатора. В цепи возникал ток, величина которого была пропорциональна ионизирующей способности порошка. Потенциал пластинки *A* можно было измерить с помощью электрометра. Для этого необходимо было разомкнуть цепь и накапливать заряд на электрометре. Скорость нарастания заряда на обкладке *A* была пропорциональна силе тока. Для измерения величины заряда Кюри использовали компенсационный метод, в котором электрометр являлся индикатором нуля заряда.

Компенсирующий заряд создавался пьезоэлектрическим кварцем, а нагрузка на кварц могла плавно регулироваться, например, весом ртути с помощью устройства для ее подлива. Таким образом, можно измерить абсолютное количество электричества, которое проходит через конденсатор за данное время, то есть определить силу тока. Чувствительность такого прибора была около 10^{-13} А.

Именно в ходе этих количественных исследований различных минералов урана и тория Кюри обнаружили удивительный факт. Активность этих минералов не была пропорциональна количеству содержащегося в них урана или тория. Некоторые из этих минералов проявляли активность в три или четыре раза большую, чем надлежало по расчету для урана. Последнее могло означать только одно: эти минералы содержат в небольшом количестве неизвестный элемент (или элементы), гораздо более радиоактивный, чем уран или торий.

Супруги Кюри предприняли ряд химических изысканий, целью которых стало выделение этого радиоактивного вещества из исходного минерала, содержащего уран и торий.

Ученые-химики утверждали, что нет никаких новых радиоактивных веществ, кроме уже известных – урана и тория. Чтобы доказать скептикам их неправоту, нужно было выделить новые элементы и измерить их атомные веса («Нет атомного веса, нет и радия. Покажите нам радий, и мы поверим», – так говорили химики), супругам Кюри для этого понадобится четыре года упорного труда. Собственными руками они перерабатывают 8 тонн урансодержащей руды и выделяют из нее 0,4 грамма (!) радия. Они химически выделили радий и полоний, измерили их атомные веса и интенсивность излучения.

2.7.3. Превращения радиоактивных элементов

В 1903 г. Уильям Рамзай и Фредерик Содди обнаруживают, что радий непрерывно выделяет также небольшое количество газа гелия. Так был обнаружен первый пример ядерного превращения. Позднее, уже работая в Англии, Резерфорд и Содди, опираясь на гипотезу, высказанную Марией Кюри, публикуют «Теорию радиоактивных превращений», в которой утверждают, что радиоактивные элементы, даже когда кажутся неизменными, находятся в состоянии самопроизвольного распада: чем быстрее процесс их превращения, тем больше их активность. Определение, данное Резерфордом и Содди, таково: радиоактивность есть не что иное, как распад атома на заряженную частицу (именно она и представляет собой радиоактивное излучение) и атом другого элемента, по своим химическим свойствам отличный от исходного. Образовавшийся атом также может испытать радиоактивный распад. Следствием этого утверждения является вывод о существовании целых радиоактивных цепочек, первый элемент которых радиоактивен, а последний – стабилен.

2.8. Закон радиоактивного распада

Закон радиоактивного распада – закон, открытый Фредериком Содди и Эрнестом Резерфордом экспериментальным путем и сформулированный ими в 1903 г.

Они, исследуя превращения радиоактивных веществ, установили опытным путем, что их активность убывает с течением времени. Для каждого радиоактивного вещества существует **период полураспада** T – время, в течение которого распадается половина первоначального количества ядер. Если, например, в материале, испытывающем радиоактивное превращение, первоначально было N_0 ядер, то через время T их станет $1/2 N_0$, через $2T$ – $1/4 N_0$, через $3T$ – уже $1/8 N_0$ и так далее. Число радиоактивных ядер будет «выгорать» в геометрической прогрессии с показателем, равным двойке. По истечении времени $t = nT$, то есть спустя n периодов полураспада, число не распавшихся радиоактивных ядер N останется следующим:

$$N = N_0 \frac{1}{2^n} = N_0 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Это закон экспоненциального распада радиоактивных ядер (рис. 2.12). Периоды полураспада для различных радиоактивных веществ изменяются от миллиардов лет до миллионных долей секунды и хорошо поддаются вычислению с помощью квантовой механики.

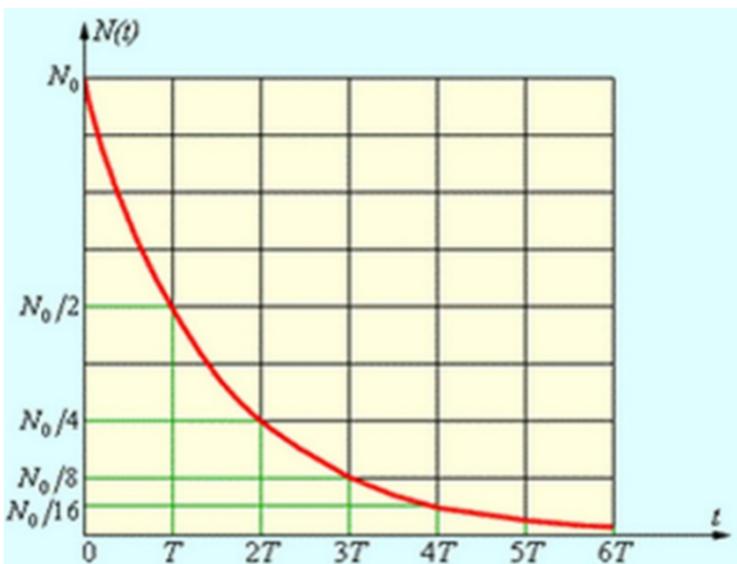


Рис. 2.12. Экспоненциальный распад ядер (то есть экспоненциальная убыль числа радиоактивных ядер со временем; в течение каждого периода полураспада их число убывает вдвое)

Период полураспада определяет скорость радиоактивного распада, и чем он меньше, тем больше активность радиоактивного вещества, то есть число распадов в единицу времени.

Прологарифмировав эту формулу:

$$\ln N = \ln N_0 - \frac{t}{T} \ln 2 \equiv \ln N_0 - \frac{t}{\tau}, \quad \text{где } \tau \equiv \frac{T}{\ln 2},$$

можно записать закон радиоактивного распада в виде

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

где $e = 2,718\ 28\dots$ – число Эйлера (основание натурального логарифма), величина $\tau = T/\ln 2$ называется **временем жизни** ядра. Оно также характеризует скорость радиоактивного распада и равно промежутку времени, за который число радиоактивных ядер уменьшается в e раз. Поскольку $\ln 2 \approx 0,7$, время жизни больше периода полураспада. Это понятно, поскольку за это время распадается не половина, а большее (почти 2/3) количество ядер.

Активность – число распадающихся ядер в единицу времени. Ее легко вычислить:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{1}{\tau} N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{N}{\tau} \equiv -\frac{N \ln 2}{T}.$$

В системе СИ единицей активности является беккерель – 1 распад в секунду (Бк, Bq); 1 Бк = с⁻¹. внесистемными единицами активности являются: кюри (Ки, Ci); 1 Ки = 3,7 · 10¹⁰ Бк; резерфорд (Рд, Rd); 1 Рд = 10⁶ Бк.

2.8.1. Измерение периодов полураспада

Измерение периода полураспада **короткоживущих ядер** сводится к определению промежутка времени, в течение которого интенсивность излучения спадает вдвое.

Период полураспада **долгоживущих ядер** можно вычислить, измерив число атомов, распадающихся в единицу времени (равное числу испускаемых за это время частиц), и зная полное число атомов в образце. Действительно, доля числа атомов, распадающихся за некоторое время, зависит от периода полураспада. Чем меньше период полураспада, тем быстрее распад и тем большая доля атомов распадается за то же время.

Измерения такого рода дают для периода полураспада радия, например, величину 1 600 лет. Естественно, что за промежутки времени порядка года убыль радия настолько мала, что изменение его активности практически незаметно.

Из геологии известно, что возраст минералов измеряется миллионами лет. За промежутки времени геологического масштаба распад радия должен был бы привести к его полному исчезновению. Очевидно, в природе наряду с распадом происходит образование новых атомов радия. Тот факт, что радий всегда содержится в урановых, и только в урановых рудах, наводит на мысль, что источником новых атомов радия служит радиоактивный распад урана.

Уран является альфа-радиоактивным веществом, то есть испускает альфа-частицы. Период полураспада урана (точнее, основного изотопа урана с атомной массой 238), измеренный по альфа-активности, составляет 4,5 млрд (4,5 · 10⁹) лет. Даже по геологической шкале времени распад урана происходит весьма медленно.

2.8.2. «Судный день откладывается»...

В мае 1904 г. Королевское общество и Лондонский королевский институт хотели услышать Резерфорда. «Последовательность превращений в радиоактивных семействах» – так называлась его лекция. Резерфорд систематизировал данные о двадцати с лишним радиоактивных элементах и объединил их в семейства урана, тория, актиния, радия. И возникла таблица, почти пародийно напоминающая сегодняшние таблицы элементарных частиц. Обязательная графа «время жизни» там была представлена графой «период полураспада».

«Судный день откладывается» – такую превосходную шапку для отчета об этой лекции Резерфорда нашел один журналист. Речь шла о наиболее впечатляющем тезисе Резерфорда. Суть вот в чем. За несколько часов до выступления в Королевском институте, прогуливаясь по Лондону, он нечаянно встретился со старым знакомым – профессором геологии Адамсом. Резерфорд шел в задумчивости, подбрасывая на широкой ладони кусочек уранового минерала: осознание предмета размышлений помогало мыслям не разбредаться. И почтенный геолог был удивлен, услышав вместо приветствия:

– Адамс, как, по-вашему, стара Земля?

– Земля? Сто миллионов лет!

– А я знаю, не предполагаю, а знаю, – сказал Резерфорд, – что вот этому кусочку урановой смолки семьсот миллионов лет...

Адамсу ничего не оставалось, как вопросительно уставиться на Резерфордову ладонь. Сто восемь миллионов лет – это был возраст Земли, который дали знаменитые термодинамические расчеты лорда Кельвина, сомнению не подлежащие. В их основе лежали простые соображения: наша планета постепенно охлаждается, всей поверхностью излучая тепло в пространство, и эти потери не компенсируются изнутри никакими особыми источниками энергии... Отчего же могло бы замедлиться кельвиновское остывание земного шара? Как сто миллионов лет могли превратить в семьсот?

Однако вечером в Королевском институте слушатели Резерфорда убедились, что расчеты Кельвина больше не действительны. Радиоактивные элементы – вот особый и очень обильный источник энергии в недрах Земли! И простые выкладки показали, что со «дня творения» прошли уже миллиарды лет. И пройдут еще миллиарды, пока не настанет «конец света». Словом, и вправду оказывалось: «Судный день откладывается!» Даже сам великий старик вынужден был в тот вечер признать себя обезоруженным.

2.9. Радиоактивное излучение

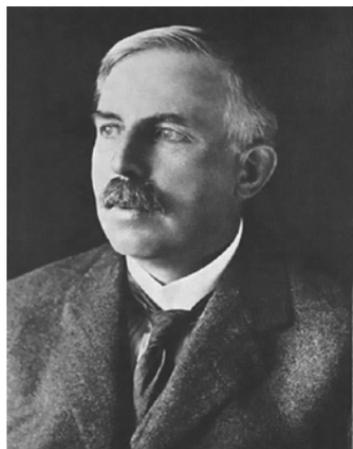
Эрнест Резерфорд, тогда работавший в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета, стал одним из ученых, кто проявил живейший интерес к открытию Беккереля.

С 1898 г. Резерфорд начинает самостоятельные исследования в области радиоактивности. Он обнаружил, что открытое Беккерелем излучение неоднородно, и нашел, что оно состоит из двух сильно различающихся по *проникающей способности* компонент радиоактивного излучения, названных им альфа- и бета-излучением.

Позднее он доказал, что в него входят потоки положительно заряженных ядер гелия – альфа-частицы и потоки электронов – бета-частицы. Они отклоняются магнитным полем в разные стороны.

В 1900 г. французский ученый **Поль Ульриш Виллар** нашел в составе излучения третью, наиболее проникающую компоненту – гамма-лучи (названные так по аналогии), состоящие из незаряженных частиц, на которые магнитное поле не оказывает воздействия.

Позднее было показано, что гамма-излучение представляет собой поток электромагнитных квантов высоких энергий.



Эрнест Резерфорд (*Ernest Rutherford*; 1871–1937)



Поль Ульриш Виллар (*Paul Ulrich Villard*; 1860–1934)

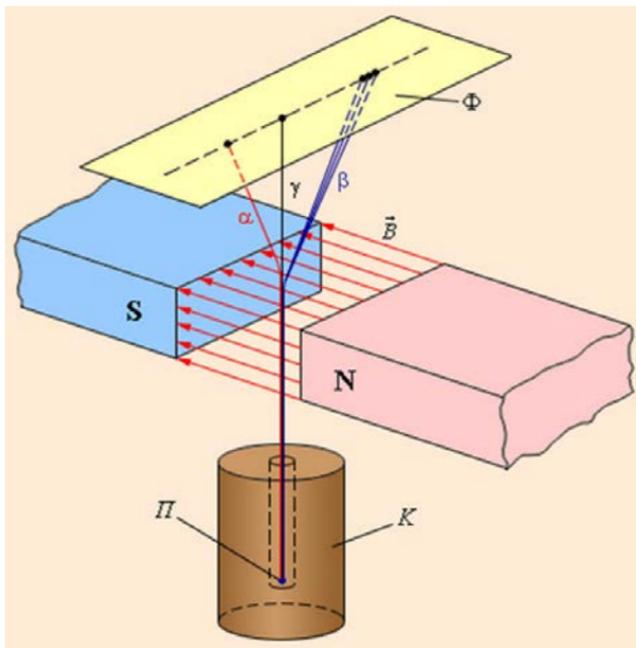


Рис. 2.13. Суммирующая результаты разных экспериментов картина поведения лучей в магнитном поле. Альфа- и бета-лучи отклоняются магнитным полем в разные стороны, гамма-лучи в магнитном поле не отклоняются

Важная деталь: в отличие от альфа-частиц и гамма-лучей энергетический спектр бета-лучей не дискретный. Они имеют разную энергию и поэтому отклоняются на разные углы, давая полосу, а не точки, как альфа- и гамма-излучения (рис. 2. 13).

Исследования показали: альфа-лучи – положительно заряженные альфа-частицы, ядра гелия (масса 4 а. е. м, заряд $+2e$, $v \sim 10\,000$ км/с); бета-лучи – поток электронов; гамма-лучи – коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны $\lambda < 10^{-10}$ м.

Долгое время было неясно, откуда берутся все эти лучи. В течение нескольких десятилетий трудами многих физиков была выяснена природа радиоактивного излучения и его свойства.

2.9.1. Альфа-излучение

Альфа-лучи испускают главным образом ядра самых тяжелых и потому менее стабильных атомов (в периодической таблице они расположены после свинца). Это – высокоэнергетичные частицы. Обычно наблюдается несколько групп альфа-частиц, каждая из которых имеет строго определенную энергию. Так, почти все альфа-частицы, вылетающие из ядер ^{226}Ra , обладают энергией в 4,78 МэВ, и небольшая доля альфа-частиц – энергией в 4,60 МэВ. Другой изотоп радия, ^{221}Ra , испускает четыре группы альфа-частиц с энергиями 6,76; 6,67; 6,61 и 6,59 МэВ. Это свидетельствует о наличии в ядрах нескольких энергетических уровней, их разность соответствует энергии излучаемых ядром гамма-квантов. Известны и «чистые» альфа-излучатели (например, ^{222}Rn).

По формуле $E = mv^2/2$ можно подсчитать скорость альфа-частиц с определенной энергией. Например, для альфа-частиц с $E = 4,78$ МэВ $v \sim 15\,200$ км/с, что в десятки тысяч раз больше скорости пулевой пули и в ~ 20 раз меньше скорости света. Альфа-частицы обладают самым сильным ионизирующим действием: сталкиваясь с любыми другими атомами в газе, жидкости или твердом теле, они «обдирают» с них электроны, создавая заряженные частицы. При этом альфа-частицы очень быстро теряют энергию (они задерживаются даже листом бумаги). В воздухе альфа-излучение радия проходит всего 3,3 см, альфа-излучение тория – 2,6 см и т. д. В конечном счете потерявшая кинетическую энергию альфа-частица захватывает два электрона и превращается в атом гелия. При захвате электронов альфа-частицами выделяется огромная энергия (более 7 600 кДж/моль), поэтому ни один атом, кроме атомов самого гелия, не в состоянии удержать свои электроны, если по соседству окажется альфа-частица.

Очень большая кинетическая энергия альфа-частиц позволяет «увидеть» их невооруженным глазом (или с помощью обычной лупы), впервые это продемонстрировал в 1903 г. Уильям Крукс. Он приклеил на кончик иглы еле видимую глазом крупинку радиевой соли и укрепил иглу в широкой стеклянной трубке. На одном конце этой трубки, недалеко от кончика иглы, помещалась пластинка, покрытая слоем люминофора (им служил сернистый цинк), а на другом конце было увеличительное стекло. Если в темноте рассматривать люминофор, то видно: все поле зрения усеяно вспыхивающими и сейчас же гаснущими искрами. Каждая искра – это результат удара одной альфа-частицы. Крукс назвал этот прибор спинтарископом (от греч. *spintharis* – искра и *skopeo* – смотрю, наблюдаю). С помощью этого простого метода подсчета альфа-частиц был выполнен ряд исследований, например, этим способом можно было довольно точно определить постоянную Авогадро.

2.9.2. Бета-распад

Бета-распад наблюдается как у тяжелых, так и у легких ядер, например у трития. Образующиеся в результате бета-распада легкие бета-частицы (быстрые электроны) обладают существенно более высокой проникающей способностью. Так, в воздухе бета-частицы могут пролететь несколько десятков сантиметров, в жидких и твердых веществах – от долей миллиметра до ~ 1 см. В отличие от альфа-частиц и гамма-излучения, энергетический спектр бета-лучей не дискретный, а непрерывный. Энергия вылетающих из ядра электронов может меняться почти от нуля до некоторого максимального значения, характерного для данного радиоактивного ядра (радионуклида). Обычно средняя энергия бета-частиц намного меньше, чем у альфа-частиц; например, энергия бета-излучения ^{228}Ra составляет 0,04 МэВ. Но бывают и исключения: так, бета-излучение короткоживущего нуклида ^{11}Be несет энергию 11,5 МэВ.

Непрерывность бета-спектра обнаружил английский ученый Джеймс Чедвик в 1914 г., впоследствии сделавший одно из величайших открытий в истории человечества. Он открыл нейтрон (1932) – еще один фундаментальный кирпичик, из которых построены ядра атомов вещества. Долгое время до открытия нейтрона считалось, что ядра состоят из протонов и электронов, казалось это очевидным, поскольку из ядер вылетают электроны, а альфа-частицы выбивают из ядер протоны. Однако эта модель имела ряд нерешенных противоречий: например, в ядре азота ${}^7\text{N}^{14}$ должно было бы содержаться 14 протонов и 7 электронов (массовое число $A = 14$, заряд $Z = 7$), тогда, поскольку спины протона и электрона (квантовые характеристики вращательного движения частиц) равны $\frac{1}{2}$, спин ядра азота должен быть полуцелым. Из эксперимента же следовало, что целый (это противоречие получило название «азотная катастрофа»). Кроме того, было совершенно неясно, куда девается магнитный момент электрона??? Он в 1 800 раз больше протонного, а ядра имеют магнитные моменты того же порядка, что и у протона.

Выход предложили советские ученые Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904–1994) и Виктор Амазаспович Амбарцумян (1908–1996). В своей работе, выполненной в 1930 г., они, в противовес господствующему тогда мнению, что атомные ядра состоят из протонов и электронов, доказывали, что в атомном ядре **не могут существовать свободные электроны** и что кроме протонов там должны быть какие-то нейтральные частицы. Фактически это было предсказанием существования нейтрона, которое было сделано за два года до его открытия Дж. Чедвиком. В том же 1930 г. В. А. Амбарцумян и Д. Д. Иваненко, чтобы объяснить, откуда берутся электроны при бета-распаде ядер, высказали гипотезу о возможности рождения и исчезновения любых частиц в результате их взаимодействий, а не только фотонов.

То есть электрон рождается в процессе бета-распада (а не просто вылетает из ядра) точно так же, как фотон рождается в результате перехода атома из одного состояния в другое, не имея индивидуального существования внутри атома. Сейчас эта ключевая мысль – основа современных представлений о взаимодействиях элементарных частиц, поэтому эти работы могут быть включены в список наиболее выдающихся работ по строению атомного ядра и элементарных частиц.

После того как в 1932 г. был открыт нейтрон, Д. Д. Иваненко сразу опубликовал статью о том, что атомные ядра состоят из протонов и нейтронов. Спустя несколько месяцев немецкий физик Вернер Гейзенберг (1901–1976) поддержал и развил эту идею (со ссылкой на работу Иваненко). В таком случае бета-частицы должны образоваться в результате внутриядерного процесса превращения нейтрона в протон и электрон: $n \rightarrow p + e$. Масса нейтрона немного превышает суммарную массу протона и электрона, избыток массы, в соответствии с формулой Эйнштейна $E = mc^2$, дает кинетическую энергию вылетающего из ядра электрона, поэтому бета-распад наблюдается в основном у ядер с избыточным числом нейтронов. Например, нуклид ^{226}Ra – альфа-излучатель, а все более тяжелые изотопы (ядра с одинаковым числом протонов Z и разным числом нейтронов N) радия (^{227}Ra , ^{228}Ra , ^{229}Ra и ^{230}Ra) – бета-излучатели.

Однако при этом энергия бета-частицы должна быть фиксированной, непрерывность же бета-спектра оставалась загадкой: было неясно, каким образом из одинаковых ядер одного и того же элемента вылетают частицы с разными скоростями. Более того, суммарная энергия всех этих электронов (она была измерена с помощью калориметра) оказалась меньше, чем разность энергии исходного ядра и продукта его распада. Снова физики столкнулись с «нарушением» закона сохранения энергии: часть энергии исходного ядра непонятно куда исчезала.

Незыблемый физический закон «спас» в 1931 г. (через 33 года после открытия бета-распада!) швейцарский физик Вольфганг Паули (1900–1958), который предположил, что при бета-распаде из ядра вылетают две частицы: электрон и гипотетическая нейтральная «невидимая» частица – нейтрино (сначала Паули назвал ее «нейтрон») с почти нулевой массой, которая и уносит избыток энергии. Непрерывный спектр бета-излучения объясняется распределением энергии между электронами и этой частицей. Нейтрино (точнее, при бета-распаде образуется электронное антинейтрино) очень слабо взаимодействует с веществом (например, легко пронзает по диаметру земной шар и даже огромную звезду), и поэтому его долго не удавалось обнаружить. Экспериментально свободные нейтрино были зарегистрированы только в 1956 г. Таким образом, уточненная схема бета-распада такова: $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$. Здесь символом $\bar{\nu}_e$ обозначено электронное антинейтрино.

Количественную теорию бета-распада ядер на основе идеи Амбарцумяна – Иваненко о рождении частиц в процессе взаимодействия и гипотезы Паули о существовании нейтрино разработал в 1933 г. итальянский физик Энрико Ферми (1901–1954), он же и предложил название «нейтрино» (по-итальянски – «нейтрончик»).

Часть 3. СТРОЕНИЕ АТОМА. ЭКСПЕРИМЕНТЫ РЕЗЕРФОРДА

3.1. Необходимые сведения

3.1.1. Что такое электронвольт

Единица энергии 1 эВ (электронвольт) отвечает кинетической энергии, которую приобретает электрон (или другая частица с зарядом e , равным заряду электрона) в электрическом поле с разностью потенциалов 1 В (вольт).

Наиболее употребительные производные единицы:

$$1 \text{ нэВ (наноэлектронвольт)} = 10^{-9} \text{ эВ};$$

$$1 \text{ мэВ (миллиэлектронвольт)} = 10^{-3} \text{ эВ};$$

$$1 \text{ кэВ (килоэлектронвольт)} = 10^3 \text{ эВ};$$

$$1 \text{ МэВ (мегаэлектронвольт)} = 10^6 \text{ эВ};$$

$$1 \text{ ГэВ (гигаэлектронвольт)} = 10^9 \text{ эВ};$$

$$1 \text{ ТэВ (тераэлектронвольт)} = 10^{12} \text{ эВ}.$$

Массы элементарных m_0 частиц, точнее их энергии покоя ($E = m_0 c^2$ – формула Эйнштейна), в настоящее время также приводятся в электронвольтах (табл. 3.1). См., например, Particle data group (PDG): <http://pdg.lbl.gov/>

Таблица 3.1

Массы элементарных частиц

Название частицы	Символ	Масса частицы
электрон	e	$m_e = 0,5110 \text{ МэВ}$
пи-мезоны	π^\pm	$m_{\pi^\pm} = 139,6 \text{ МэВ}$
протон	p	$m_p = 938,3 \text{ МэВ} = 1\,836\, m_e = 6,7\, m_{\pi^\pm}$

В Международной системе единиц (СИ) единицей заряда является кулон (Кл). Кулон равен количеству электричества, проходящего через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за время 1 с: $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$ (производными единицами от ампера являются: 1 миллиампер (мА) = 10^{-3} А,

1 микроампер (мкА) = 10^{-6} А). Поскольку заряд электрона равен $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, то в единицах СИ 1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Пример. В Гатчине, на ускорителе НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ протоны разгоняются до энергии в 1 ГэВ (миллиард электронвольт), ток в ускорителе равен ~ 1 мкА. Спрашивается, сколько протонов в единицу времени пролетает через сечение пучка и какая энергия будет выделяться в мишени, которая поглощает этот пучок?

Ток в 1 мкА означает, что через сечение пучка за 1 с проходит 10^{-6} Кл, что равно заряду $0,62 \cdot 10^{13}$ протонов, которые и пролетают через это сечение за секунду. Их энергия 1 ГэВ соответствует энергии частицы с зарядом e , ускоренной в поле с разностью потенциалов 10^9 В. Таким образом, в мишени будет выделяться мощность (энергия в единицу времени) 10^3 Дж/с, то есть 1 кВт.

Ускорители протонов на такую энергию, но с токами в несколько мА, то есть на три порядка более высокими, используются для производства мезонов, которые рождаются при столкновениях протонов с ядрами на специальных мезонообразующих мишенях, например из углерода (мезонные фабрики), и нейтронов, которые выбиваются из ядер тяжелых элементов (таких как свинец или ртуть) в так называемых спаллейшн-источниках нейтронов (их еще называют источниками скалывания). В таких мишенях выделяются уже мегаватты мощности. Таким образом, для получения интенсивных пучков нейтронов или мезонов на ускорителях, с одной стороны, возникает проблема охлаждения мишеней, а с другой стороны, для работы одного такого ускорителя требуется электростанция мощностью в сотни мегаватт.

3.1.2. Скорости и энергии частиц в разных процессах

Как по энергии определить скорость частицы и, в частности, понять степень близости этой скорости к скорости света, то есть понять, релятивистская частица или нет?

Вспомним релятивистскую связь между энергией E и импульсом p частицы (уравнение дисперсии):

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4,$$

где m_0 – масса покоя частицы. Кроме того, имеем определение импульса $p = mv$ и известное выражение Эйнштейна $E = mc^2$, где m – релятивистская масса. В результате из уравнения дисперсии получим связь релятивистской массы с массой покоя частицы:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \equiv m_0 \gamma.$$

Величина γ есть отношение релятивистской массы и массы покоя, или, другими словами, γ – это полная энергия частицы $E = mc^2$, выраженная в единицах энергии покоя m_0c^2 . С другой стороны, величина $\beta = v/c$ есть скорость частицы, выраженная в единицах скорости света. Таким образом, релятивистская связь энергии частицы с ее скоростью:

$$\frac{E}{m_0c^2} = \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \text{ и обратно: } \beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}.$$

В нерелятивистском случае $\beta \ll 1$ (скорость частицы v значительно меньше скорости света $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ см/с = 300 000 км/с), при этом $\gamma \approx 1$ и

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = \sqrt{\frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2}} = \sqrt{\frac{(\gamma - 1)(\gamma + 1)}{\gamma^2}} \approx \sqrt{2(\gamma - 1)}.$$

Это выражение отвечает известной связи между кинетической энергией и скоростью в обычной нерелятивистской механике Ньютона. Действительно, из него следует:

$$\gamma = 1 + \frac{\beta^2}{2}.$$

Здесь энергия измеряется в единицах энергии покоя, а скорость – в единицах скорости света. Умножением на m_0c^2 (с учетом того, что $\gamma = E/m_0c^2$, $\beta = v/c$) получаем обычную формулу для кинетической энергии:

$$E = m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2}.$$

Пример 1. Пусть кинетическая энергия теплового нейтрона равна 0,1 эВ (именно такие нейтроны используются для изучения структуры вещества, их источниками являются, например, исследовательские ядерные реакторы, такие как реактор ВВР-М в нашем институте. Спрашивается: чему равна его скорость?

Будем считать, что масса нейтрона приблизительно равна 1 ГэВ (около 940 МэВ), то есть 10^9 эВ. В этом случае

$$\gamma - 1 = \frac{0,1 \text{ эВ}}{10^9 \text{ эВ}} = 10^{-10} = \frac{\beta^2}{2}, \text{ то есть } \beta = 10^{-5} \sqrt{2}.$$

Таким образом, $\beta \approx 1,4 \cdot 10^{-5}$, или $v \approx 4,2 \cdot 10^5$ см/с, то есть 4,2 км/с. В этих единицах постоянная Больцмана $k \approx 8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К, так что 0,1 эВ отвечает температуре ~ 1160 К (~ 890 °С). В исследовательском реакторе ВВР-М температура воды в замедлителе ~ 295 К (22 °С), что отвечает энергии 0,025 эВ и скорости 2,2 км/с; такую скорость имеют максимальное количество нейтронов в их распределении по скоростям. Поэтому нейтроны с энергиями от 0,01 до 0,1 эВ называются тепловыми.

Пример 2. Кинетическая энергия протонов ускорителя ИФВЭ (Институт физики высоких энергий, г. Серпухов) – 70 ГэВ, в этом случае $\gamma \approx 71 \gg 1$, частицы являются релятивистскими, и

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \approx 1 - \frac{1}{2\gamma^2} = 1 - 10^{-4}.$$

Это приближенное равенство легко проверяется возведением в квадрат. Величина β^2 отличается от точного значения на $1/4\gamma^4 \sim 10^{-8}$. Таким образом, отличие скорости частицы от скорости света $\sim 10^{-4}$, то есть 30 км/с с ошибкой в несколько м/с.

Пример 3 (из предыдущего раздела). Как мы говорили, почти у всех альфа-частиц, вылетающих из ядер ^{226}Ra , энергии $\sim 4,8$ МэВ. Масса альфа-частицы представляет собой ядро гелия с атомной массой 4 (то есть с массой $m_{\text{He}}c^2 \approx 4$ ГэВ). Таким образом,

$$\gamma - 1 = 4,0048/4 - 1 = 0,0012 = \beta^2/2, \beta^2 = 0,0024.$$

В результате $\beta \approx 0,05$, то есть скорость такой альфа-частицы составляет 5 % от скорости света:

$$v \approx 3 \cdot 10^{10} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ см/с} = 1,5 \cdot 10^9 \text{ см/с} = 15\,000 \text{ км/с}.$$

В продуктах распада есть источники альфа-частиц с энергией ~ 8 МэВ, их скорости уже $\sim 20\,000$ км/с.

Именно по той причине, что масса и скорость альфа-частиц велики, они очень слабо отклоняются магнитным полем по сравнению с бета-частицами. Степень отклонения, с одной стороны, определяется сообщаемым магнитным полем частице ускорением, а оно обратно пропорционально массе, с другой – временем пребывания частицы в магнитном поле, которое обратно пропорционально скорости движения частицы. Пьер Кюри обнару-

жил, что при действии магнитного поля на излучение радия одни лучи отклоняются, а другие – нет. Было известно, что магнитное поле отклоняет только заряженные летящие частицы, причем заряды разных знаков – в противоположные стороны. По направлению отклонения убедились в том, что отклоняемые бета-лучи заряжены отрицательно. Дальнейшие опыты показали, что между катодными и бета-лучами нет принципиальной разницы, откуда следовало, что они представляют собой поток электронов.

Что же касается альфа-частиц, то Резерфорду пришлось затратить несколько лет упорного труда, провести ряд остроумных экспериментов, для того чтобы обнаружить их отклонение в магнитном и электрическом полях, определить их заряд и массу, понять, что они представляют собой поток дважды ионизированных атомов гелия.

В конечном счете выяснилось, что альфа-частицы есть не что иное, как ядра атомов гелия.

3.2. Опыты Резерфорда по отклонению альфа-лучей в магнитном и электрическом полях. Выяснение природы альфа-частицы

Отклоняющиеся бета-лучи обладали более сильной способностью проникать через различные материалы, тогда как не отклоняющиеся легко поглощались даже тонкой алюминиевой фольгой. Так вело себя, например, излучение нового элемента полония: оно не проникало даже сквозь картонные стенки коробки, в которой хранился препарат.

Эрнест Резерфорд в своей статье 1903 г., посвященной поиску отклонения альфа-частиц в сильном магнитном поле, пишет: «Радий является источником радиации трех разных типов:

1) альфа-лучи – легко поглощаются тонким слоем вещества и вызывают сильную ионизацию в газе, наблюдаемую в обычных экспериментальных условиях;

2) бета-лучи – состоят из отрицательно заряженных частиц с очень высокими скоростями, во всех отношениях похожи на катодные лучи, получаемые в вакуумных трубках;

3) гамма-лучи – отличаются очень сильной проникающей способностью и не отклоняются магнитным полем».

Для иллюстрации разницы проникающей способности этих лучей Резерфорд приводит табличку (табл. 3.2), которая показывает соответствующую толщину алюминиевого слоя, при прохождении которого интенсивность лучей падает вдвое (то есть половина лучей поглощается).

Разница проникающей способности лучей

Тип радиации	Толщина алюминия, мм
альфа-лучи	0,005
бета-лучи	0,5
гамма-лучи	80

Отклонения альфа-лучей в магнитном поле долгое время обнаружить не удавалось, даже в самых сильных по тем временам полях. Нужен был сильный магнит. Однажды осенью 1902 г. Резерфорд, работавший в то время в университете Макгилла (Монреаль, Канада), зашел в электротехническую лабораторию, которую возглавлял его старый друг Роберт Оуэнс, тот понял его с полуслова. Едва ли не в тот же день начался демонтаж самой большой университетской динамо-машины Эдисона мощностью в 30 кВт. «Благодаря доброте профессора Оуэнса я получил возможность создать достаточно сильное поле, чтобы полностью отклонить альфа-лучи».

В 1903 г. Резерфорд добился положительных результатов и показал, что альфа-излучение должно состоять из положительно заряженных частиц, движущихся с большими скоростями. Сравнивая отклонения альфа-частиц в электрическом и магнитном полях, он одновременно измерил скорость альфа-частицы и отношение ее заряда к массе (то есть удельный заряд альфа-частицы).

3.2.1. Небольшое отступление об электромагнитах

Это отступление сделано, для того чтобы акцентировать внимание читателя на том, что любые новые знания (в том числе и этот результат Резерфорда с коллегами) всегда добываются на пределе возможностей человеческой мысли и изобретательности, с использованием новейших достижений науки и техники на данный момент времени. Поэтому прогресс обусловлен теми, кто работает с предельным напряжением и устремлен на поиск нового. Нередко бывает, что новые явления (или устройства) открываются (изобретаются) практически одновременно несколькими людьми (или группами) в одной или разных странах, поэтому иногда бывает трудно определить приоритеты, и мы часто пользуемся результатами их трудов, даже не задумываясь о тех, кто проложил первые тропы.

Первый в мире электромагнит, продемонстрированный Уильямом Стердженом 23 мая 1825 г. Обществу искусств, представлял собой согнутый в подкову лакированный железный стержень длиной 30 и диаметром 1,3 см, покрытый сверху одним слоем неизолированной медной проволоки. Электроэнергией он снабжался от гальванической батареи (вольтова столба). Электромагнит удерживал на весу 3 600 г и значительно превосходил по силе природные магниты такой же массы. Это было блестящее по тем временам достижение.

Джеймс Джоуль, экспериментируя с самым первым магнитом Стерджена, сумел довести его подъемную силу до 20 кг. Это было в том же 1825 г. В 1828 г. лондонский часовой мастер Воткинс изготовил электромагнит, который поднимал 30 кг.

В 1832 г. Стерджен изготовил магнит, поднимавший 160 кг, но уже в том же году Марш создал магнит, способный поднять более 200 кг. Однако Стерджен не собирался терять первенства. По его заказу в 1840 г. был выполнен электромагнит, способный поднять уже 550 кг!

К тому времени у Стерджена нашелся очень сильный соперник за океаном. В апреле 1831 г. Джозеф Генри (его именем названа единица индуктивности) в Олбани построил электромагнит массой около 300 кг, поднимавший около 1 т (рис. 3.1). В 1832 г. Генри стал профессором Принстонского колледжа (ныне Принстонский университет), в 1846 – директором Смитсоновского института в Вашингтоне (США).

Генри изобрел «многокатушечную» обмотку, позволившую заметно увеличить подъемную силу электромагнита. Он предложил размещать на электромагните до десяти подобных обмоток – так появились первые в мире технические образцы катушек (называвшиеся бобинами). В процессе многочисленных экспериментов он изменял количество и схему подключения



Уильям Стерджен
(*William Sturgeon*;
1783–1850) – английский
электротехник



Джеймс Прескотт Джоуль
(*James Prescott Joule*;
1818–1889) – английский
физик, пивовар



Джозеф Генри
(*Joseph Henry*; 1797–1878) –
американский физик

катушек к двум гальваническим батареям и сумел создать «силовые» электромагниты с фантастической подъемной силой – от 30 до 325 кг (при собственном весе магнита 10 кг).

Все эти магниты по конструкции представляли собой подковообразные стержни, обмотанные проволокой. Джеймс Джоуль в ноябре 1840 г. создал магнит собственной конструкции – в виде толстой стальной трубы, разрезанной вдоль оси. Магнит оказался компактным и поднимал 1,3 т. Тогда же Джоуль придумал магнит совершенно новой конструкции: притягиваемый груз испытывал действие не двух полюсов, как обычно, а значительно большего количества, что позволило резко увеличить поднимаемый груз. Магнит массой 5,5 кг удерживал груз массой 1,2 т.

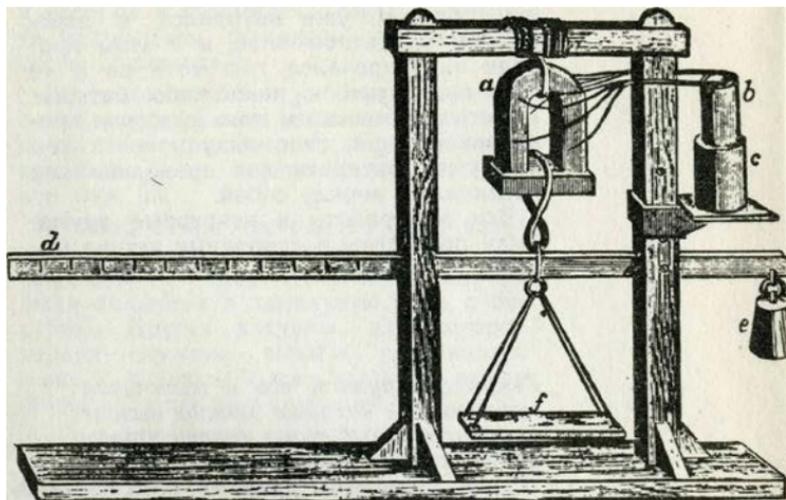


Рис. 3.1. Электромагнит, построенный Генри и способный поднять груз весом в тонну. На подковообразный магнит из мягкого железа было намотано большое количество витков изолированной проволоки (он был первым, кто применил новую технологию создания электромагнита с использованием обмоток из изолированного провода, намотанного на железный сердечник, позволившую существенно увеличить число витков). Ток от гальванической батареи *bc* превращал подкову в магнит, и она притягивала плоскую железную плиту, называемую якорем. К якорю была подвешена платформа, на которую можно было поместить известный груз

Лабораторные магниты того периода изготавливались «на глазок». Никакой теории, которая позволила бы заранее предсказать свойства магнитов, не существовало. Даже закона Ома в то время не знали, хотя Ом сформулировал его в 1826 г. Все работы по этому вопросу он объединил в книге: “Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet” – «Гальваническая цепь, обработанная математически» (1827), в которой дал и теоретический вывод своего закона. Книга была переведена на английский (1841), итальянский (1847) и французский (1860) языки. Несмотря на важность этих работ, они сначала прошли незамеченными и были встречены даже враждебно, и лишь когда Клод Пулье во Франции опытным путем снова пришел (1831–1837) к тем же результатам, закон Ома был принят ученым миром, и Лондонское королевское общество на заседании 30 ноября 1841 г. наградило Ома медалью Копли.

Первый вклад в теорию расчета электромагнитов внесли русские ученые Э. Х. Ленц и Б. С. Якоби. Они указали на связь подъемной силы электромагнита с произведением силы тока в катушке на число витков ее обмотки.

Эмилий Христианович Ленц (1804–1865) – российский физик, океанограф и путешественник, профессор, доктор филологии, действительный член Императорской Санкт-Петербургской академии наук, участник второго кругосветного плавания О. Е. Коцебу, исследователь Камчатки.

После Ленца и Якоби важный вклад в расчеты магнитов внесли англичане братья Гопкинсоны, которые предложили метод учета насыщения – явления, давно замеченного проектировщиками магнитов. Его суть заключается в том, что в магните заданной формы после некоторого предела увеличения тока в катушках нельзя повысить его подъемную силу. Современная теория связывает это явление с тем, что при достижении некоторого намагничивающего тока почти все элементарные магнитики железа (ферромагнетика), ранее расположенные беспорядочно, ориентируются в одном направлении и при дальнейшем усилении тока увеличения числа магнитиков (ориентированных в одном направлении) не происходит. Насыщение стали привело к тому, что индукция магнитного поля



первых магнитов не превышала 2 Тл. Наступила новая эра усиления мощности магнитов, но не путем увеличения их размеров, а посредством совершенствования их формы и борьбы с насыщением.



Борис Семенович Якоби (1801–1874) – российский физик, действительный член Императорской Санкт-Петербургской академии наук. Родной брат выдающегося немецкого математика Карла Якоби.

И вот появляются магниты с короткими коническими полюсами, массивными стальными магнитопроводами и громадными катушками.

Масса магнитов быстро увеличивается – теперь в большей степени за счет катушек. Если в 1881 г. самый большой в мире лабораторный магнит весил около 1 т, то в 1930 г. – уже около 120 т.

Первым отметку «5 Тл» пересек в 1903 г. магнит профессора Грея в Глазго. Ему удалось это сделать, применив мощные катушки, близко придвинутые к коническим полюсам.

Интересная идея была высказана французским ученым Перро в 1914 г. Он предложил кроме двух обычных катушек, расположенных на полюсах, использовать третью, охватывающую собой рабочую зону машин. Индукция магнитного поля магнита Перро достигла 5,1 Тл. К 1914 г. профессор Беккерель (младший) в Парижском музее естественной истории создал магнит, индукция магнитного поля которого возросла до 5,5 Тл, три других самых мощных магнита того времени – Вейса в Цюрихе, Кайзера в Бонне и Эймса в США – работали на уровне 4,5 Тл.

Следует отметить, что создание Беккерелем магнита с индукцией поля 5,5 Тл было воспринято физиками всего мира как большая сенсация. «Гигантский», «мощнейший» – писали об этом электромагните газеты. Увеличение индукции магнитного поля лишь на 10 % стоило многих трудов и ухищрений. Однако самое главное заключалось в том, что для изготовления полюсов магнита был использован новый материал – сплав железа с кобальтом, который насыщается при индукции, на несколько процентов большей, чем ранее применяемые материалы. Потребляя мощность 22 кВт, электромагнит в междуполюсном промежутке создавал поле, магнитная индукция которого составляла 5,5 Тл. При замене феррокобальтовых наконечников железными индукция полей снижалась до 5,2 Тл.

Когда расстояние между полюсами было 2 мм и полезный объем – 14 мм^3 (то есть объем, в который можно было поместить лишь небольшой

образец), индукция магнитного поля достигла 5,9 Тл. Когда же полезный объем был уменьшен до 0,5 мм³ (полюсы, по сути дела, соприкасались), индукция поля возросла до 6,5 Тл. Обмотка электромагнита состояла из тысячи витков медной трубки, по стенке которой шел ток, а по полости – охлаждающая вода. Магнит охлаждался так хорошо, что мог работать круглые сутки. Другие магниты, не имевшие искусственного охлаждения, не могли вследствие сильного нагрева работать подряд более двух часов.

В январе 2010 г. ученые и инженеры из Национальной лаборатории сильных магнитных полей Университета Флориды сообщили о создании нового магнита с рекордным значением индукции в 36,2 Тл (прежний рекорд в 35 Тл принадлежал французской Лаборатории сильных магнитных полей в Гренобле). Для этого им пришлось провести усовершенствование магнитной системы. Из-за ограничений на доступные материалы, которые бы проводили электрический ток и выдерживали возникающие напряжения, инженеры не могли превысить предельную величину магнитного поля в 35 Тл в течение четырех лет. Теперь им это удалось при мощности в 20 МВт (для сравнения: в Гренобле для достижения 35 Тл требуется 22,5 МВт электрической мощности). Очень важными оказались параметры и геометрические формы установки, которая весит более 2,5 т. Она имеет форму «бутерброда», составленного из нескольких круглых медных пластин с разрезами и отверстиями для охлаждения (во время работы через магнит прокачивают по 140 л воды в секунду), перемежаемых листами диэлектриков определенной формы.

Рабочее пространство между полюсами в 32 мм, в котором на образец действует такое магнитное поле, будет использоваться для проведения исследований в биологии, химии, геологии, материаловедении и физике.

Имеется еще одна возможность получать такие сильные поля, связанная с развитием сверхпроводящей техники и открытием высокотемпературной сверхпроводимости, которая имеет очень хорошую перспективу. Здесь проблема в том, что магнитное поле, достигая критического значения, разрушает сверхпроводимость, и необходимо создавать новые материалы с высокими критическими полями.

Та же MagLab вместе с компанией SuperPower в августе 2007 г. сообщили о новом мировом рекорде в достижении индукции магнитного поля, созданного **сверхпроводящим** магнитом. 26,8 Тл – таков рекорд постоянного магнитного поля катушки, изготовленной американскими специалистами, который приблизил их еще на один шаг к цели, поставленной Национальным исследовательским советом, – созданию сверхпроводящего магнита на 30 Тл. Авторы рекордного эксперимента использовали хорошо известный высокотемпературный сверхпроводник – иттрий-барий-медный оксид (кратко его обозначают Y-Ba-Cu-O или даже YBCO, рис. 3.2).

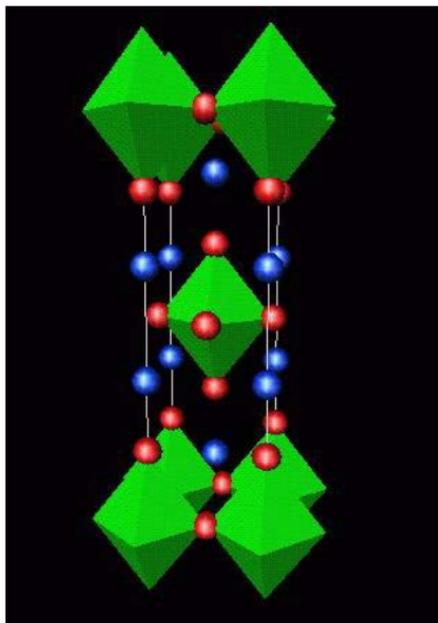


Рис. 3.2. Так выглядит структура керамического оксидного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

Таким образом, более чем за сто лет развития науки и технологий человечеству с великим трудом удалось продвинуться в величине создаваемых постоянных магнитных полей всего лишь в 7 раз, несмотря на появление и бурное развитие за это время в том числе и совершенно новой сверхпроводящей техники.

Заметим, что импульсные магнитные поля, возникающие на очень малый промежуток времени (измеряемый микросекундами), могут достигать нескольких сот Тл. Идею создания сильных импульсных полей выдвинул выдающийся советский физик, академик и нобелевский лауреат Петр Леонидович Капица, когда работал в Кавендишской лаборатории Резерфорда. В 1922 г. он создал первый импульсный магнит с индукцией 10 Тл (рис. 3.3). Позже на установке Капицы удалось получить поля до 50 Тл длительностью $\sim 0,01$ с, был выполнен ряд работ, ставших теперь классическими.

Рассматривая перспективы получения еще более сильных магнитных полей, П. Л. Капица указывал в одной из своих статей, что уже в то время (20-е гг.) состояние техники позволяло сделать конденсаторные батареи, которые могли бы создать поле 200–300 Тл. Однако технические трудности оказались столь велики, что только лишь через 40 лет таким способом удалось получить поля, о которых он говорил.

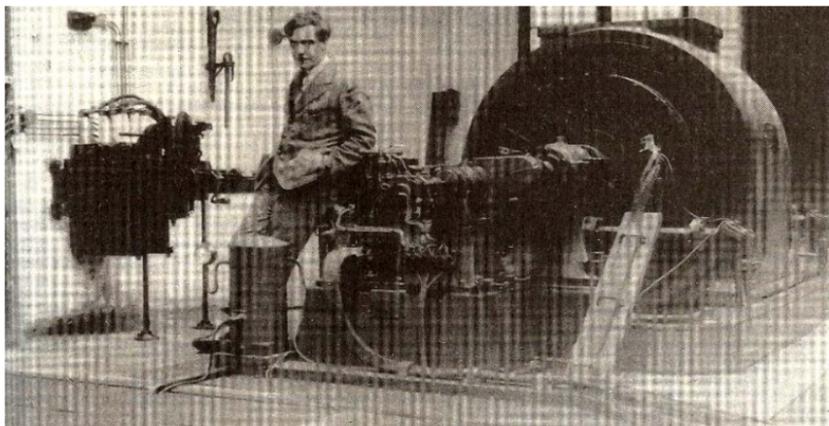


Рис. 3.3. П. Л. Капица рядом с установкой, на которой он получил в 1922 г. первое импульсное магнитное поле с индукцией 10 Тл

Рекорды, поставленные П. Л. Капицей, оставались нетронутыми более 20 лет. Они были побиты лишь в 50-х гг.

Импульсные магнитные поля условно делятся на два класса: класс сильных и класс сверхсильных. В первом магнитное поле получается без разрушения и существенной деформации соленоида; его значение лежит в области до 50–70 Тл. Здесь используются главным образом геликоидальные соленоиды, выточенные из прочных материалов (бронза, сталь). Во втором соленоид либо сильно деформируется, либо полностью разрушается; диапазон получаемых с их помощью полей простирается в область свыше 100 Тл.

Мощные конденсаторные батареи за 10 мкс могли обеспечить получение электрической мощности 1 млн кВт, или 1 млрд Вт (мощность Днепрогэса – 600 тыс. кВт), удалось получить магнитное поле более 100 Тл. Внезапное высвобождение огромной энергии происходило с грохотом, напоминающим удар грома. Вся эта лавина энергии загонялась в один-единственный массивный виток.

Как показал П. Л. Капица, соленоиды обычного типа с намотанной на них медной проволокой выживают лишь в полях до 30–35 Тл. Соленоиды биттеровского типа, изготовленные из медных дисков, оказались устойчивее, но и они выдерживали магнитные поля не выше 50–70 Тл. Соленоиды не в состоянии противодействовать огромным усилиям, возникающим в таких полях. Особенно слабым местом казалась межвитковая изоляция. Чтобы от нее избавиться, пришлось перейти на тот единственный массивный виток, который вместе с держателем изготовили из меди, закаленной стали или бериллиевой бронзы. Соленоиды для сверхсильных полей – исключительно одновитковые.

Вершиной, венчающей исследования в области сверхсильных магнитных полей, явилась серия экспериментов, проведенных в 1965 г. советскими физиками под руководством академика А. Д. Сахарова. Сама идея взрывомагнитных генераторов для получения сверхсильных импульсных магнитных полей была высказана им в 1951–1952 гг.

Если внутри замкнутого массивного витка (или цилиндра) каким-то образом создать магнитное поле, то затем, сжимая виток с помощью кумулятивного взрыва, можно добиться того, что магнитное поле (плотность магнитных силовых линий) внутри суженного витка сильно возрастет (поскольку полное число силовых линий, проходящих через виток, то есть магнитный поток, не может быстро измениться). Аналогичные идеи были позже опробованы и американскими физиками в Лос-Аламосской национальной лаборатории.

В устройстве, использованном в советских экспериментах, первоначальное магнитное поле 100 Тл создается при помощи устройства, также работавшего на взрывном принципе. Металлическое кольцо-виток диаметром 7,5–10 см окружают 4–8 кг взрывчатки. Когда внешнее поле достигает максимума, взрывчатку подрывают, и кольцо за 0,000001 с, то есть со скоростью 4 км/с, сужается до 0,4 см. В процессе такого схлопывания было измерено магнитное поле 2 500 Тл. Этот рекорд Сахарова побит только в 1999 г., и тоже в России (рекордное значение индукции импульсного магнитного поля, полученное в лаборатории сейчас, – 2 800 Тл).

3.2.2. Движение заряженных частиц в магнитном и электрическом полях. Определение удельного заряда частицы

А теперь вернемся к опытам профессора Резерфорда. Максимальное поле, которое создавал «мощный» магнит профессора Оуэнса, равнялось 0,84 Тл. Попытаемся понять, насколько велики отклонения альфа-частиц, прошедших через такое поле (рис. 3.4), и как Резерфорду удалось обнаружить эти отклонения.

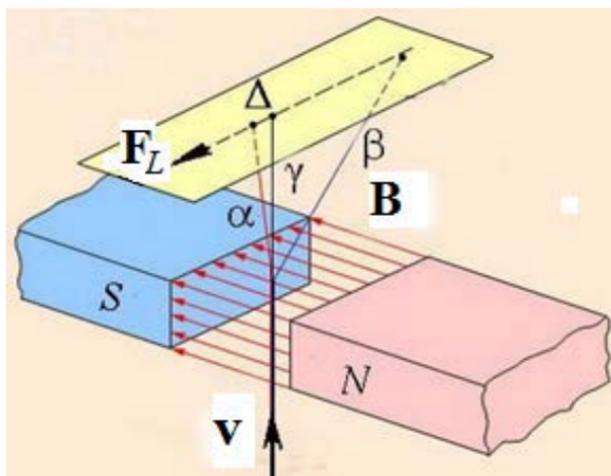


Рис. 3.4. Отклонения альфа-частиц, прошедших через магнитное поле

Напомним, что на положительно заряженную частицу с зарядом q , движущуюся со скоростью \mathbf{v} в магнитном поле с индукцией \mathbf{B} , действует **сила Лоренца** \mathbf{F}_L , равная произведению заряда на векторное произведение (см. ниже) вектора скорости \mathbf{v} на вектор магнитной индукции \mathbf{B} :

$$\mathbf{F}_L = q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}].$$

Величина силы Лоренца $F_L = qvB \sin \theta$, где θ – угол между векторами \mathbf{v} и \mathbf{B} .

Направление силы Лоренца определяется правилом буравчика, которое часто называется правилом правого винта. Суть его в следующем.

Правило буравчика. Воображаемый буравчик располагается перпендикулярно плоскости, содержащей векторы индукции \mathbf{B} и скорости \mathbf{v} , затем его рукоятка поворачивается от направления скорости к направлению вектора \mathbf{B} . Поступательное перемещение буравчика будет показывать направление силы Лоренца (рис. 3.5).

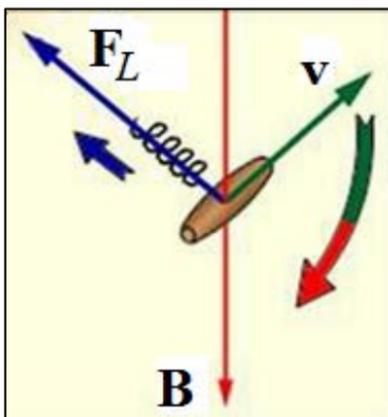


Рис. 3.5. Правило буравчика

Векторное произведение. Давайте любым двум векторам **A** и **B** сопоставим третий вектор (который называется векторным произведением векторов **A** и **B**)

$$C = [A \times B]$$

по следующим правилам.

1) Модуль вектора **C** (то есть его величина) определяется:

$$C = AB \sin \theta,$$

где θ – угол между векторами **A** и **B** (модуль векторного произведения численно равен площади параллелограмма, построенного на векторах **A** и **B**).

2) Вектор **C** перпендикулярен обоим векторам **A** и **B**, то есть плоскости, образованной векторами **A** и **B**, а его направление определяется направлением движения правого винта (буравчика) при повороте вектора **A** к вектору **B**.

Выше мы привели выражение для силы Лоренца именно в виде векторного произведения векторов **v** и **B**.

Напомним, что единицей измерения индукции магнитного поля в СИ является **тесла** (русское обозначение: **Тл**; международное обозначение: **T**), численно равная индукции однородного магнитного поля, в котором на 1 метр длины прямого проводника, перпендикулярного вектору магнитной индукции, с током силой 1 ампер действует сила 1 ньютон.

Силу, действующую на элемент проводника с током длиной Δl в магнитном поле (эта сила называется силой Ампера), легко вычислить, зная силу Лоренца.

Ток обусловлен движением элементарных зарядов (с зарядом e) в проводнике с некоторой скоростью v . Пусть концентрация этих зарядов – n , сечение проводника – S , тогда элемент проводника длиной Δl содержит заряд $Q = enS\Delta l$.

Этот заряд движется со скоростью v , и на него будет действовать сила Лоренца $F = QvB \sin\theta = enS\Delta lvB \sin\theta$ (при $\theta = \pi/2$ $\sin\theta = 1$), с другой стороны, ток есть умноженное на заряд число зарядов, пересекающих сечение проводника в единицу времени $J = envS$, откуда $enS = J/v$ и $F = JB \Delta l \sin\theta$. Это и есть закон Ампера, определяющий силу, действующую на элемент проводника с током. В векторных обозначениях:

$$\mathbf{F} = J [\Delta l \times \mathbf{B}].$$

Тесла – очень крупная единица. Магнитное поле Земли $\sim 0,5 \cdot 10^{-4}$ Тл. Большой лабораторный электромагнит может создать поле 5–8 Тл. В системе единиц СГС индукция магнитного поля измеряется в гауссах (Гс): $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$ (максимальное поле магнита Резерфорда – $8370 \text{ Гс} \approx 0,84 \text{ Тл}$).

Индукция поля на поверхности Земли сильно зависит от географического положения. На магнитном экваторе она $\sim 0,34 \text{ Гс}$, у магнитных полюсов – $\sim 0,66 \text{ Гс}$. В некоторых районах (в так называемых районах магнитных аномалий) напряженность резко возрастает. В районе Курской магнитной аномалии она достигает 2 Гс .

В системе СГС сила Лоренца записывается в виде

$$\mathbf{F}_L = \frac{q}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}],$$

где c – скорость света. В этих единицах, как нетрудно заметить, размерности электрического поля и индукции магнитного поля совпадают и определяются отношением силы к электрическому заряду, только магнитная сила содержит множитель v/c , то есть в нерелятивистском пределе $v/c \rightarrow 0$ она исчезает.

Будем измерять заряд частиц в единицах элементарного заряда, то есть примем $q = Ze$, где Z – целое число, e – величина заряда электрона. В частности, для альфа-частицы $Z = 2$. Массу тяжелых частиц (атомов, ионов) также запишем в виде $M = Am_p$, где m_p – масса протона. A уже не будет целым, но близким к целому числу (атомному номеру), с достаточной для наших целей точностью мы его также будем считать целым (для альфа-частицы $A = 4$). В результате силу, действующую на частицу, движущуюся в магнитном поле, можно переписать так:

$$\mathbf{F}_L = \frac{Ze}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}].$$

При движении альфа-частицы перпендикулярно магнитному полю со скоростью v (см. рис. 3.4) на нее действует сила

$$F_L = ZeBv / c,$$

вызывающая ускорение $a = F_L/M$ в направлении, перпендикулярном этой скорости (и магнитному полю).

Поскольку сила Лоренца (и ускорение) всегда направлена перпендикулярно скорости частицы, это означает, что вектор скорости, не меняясь по величине, вращается с постоянной угловой скоростью, то есть частица в магнитном поле, направленном перпендикулярно скорости частицы, движется по круговой орбите вокруг направления поля.

Приравняв силу Лоренца центростремительной силе, можно получить связь радиуса кривизны траектории частицы с ее скоростью и величиной магнитной индукции:

$$\frac{qBv}{Mc} = \frac{v^2}{R}.$$

Здесь R – радиус круговой орбиты частицы в магнитном поле.

Если теперь вместо магнитного приложим электрическое поле \mathbf{E} в направлении, перпендикулярном магнитному полю и скорости частицы, то частица отклонится в ту же сторону, а радиус кривизны траектории определится из аналогичного соотношения:

$$\frac{qE}{M} = \frac{v^2}{R}.$$

В результате из этих двух уравнений можем определить скорость частицы v и отношение ее заряда к массе: q/M . Удобно, меняя, например, электрическое поле, добиться равенства радиусов кривизны траекторий частиц R в электрическом и магнитном полях при некотором электрическом поле E_R , тогда сразу определяется скорость частицы:

$$\frac{v}{c} = \frac{E_R}{B}.$$

Измерив радиус кривизны и зная величину магнитного или электрического поля, можно определить и отношение q/M .

3.2.3. Опыт Резерфорда по отклонению альфа-частиц в магнитном и электрическом полях

На рисунке 3.6 изображена схема установки Э. Резерфорда из его статьи “The Magnetic and electric deviation of the easily absorbed rays from Radium” («Магнитное и электрическое отклонение легко поглощаемых лучей из радия»), опубликованной в 1903 г. в журнале Phil. Mag. 1903. V. 5. P. 177.

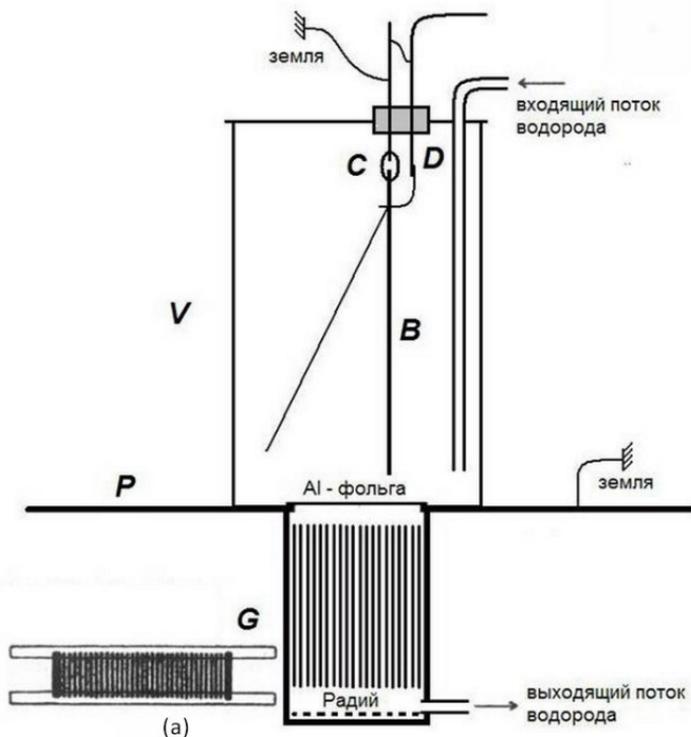


Рис. 3.6. Схема установки Э. Резерфорда

Альфа-лучи из тонкого слоя радия вылетали вверх и через систему тонких щелей G (сейчас такую систему называют многощелевым коллиматором) и тонкую алюминиевую фольгу (толщиной $0,0034$ мм) попадали в измерительную камеру V . В этой камере, заполненной водородом, измерялась ионизация, производимая альфа-лучами, при помощи электроскопа B по скорости движения его золотых лепестков. Система лепестков внутри сосуда

была изолирована при помощи бусинки из серы *C* и заряжалась подвижным проводником *D*, который после заземлялся.

Число щелей варьировалось от 20 до 25, они образовывались вставкой плоских тонких латунных пластин в вырезанные пазы, см. (а) на рис. 3.6.

В опыте, в котором Резерфорд достиг полного отклонения альфа-частиц магнитным полем, так что они не попадали в измерительную камеру, ширина щелей Δ равнялась 0,055 см, а длина пластин $L - 4,5$ см.

Магнитное поле прикладывалось перпендикулярно плоскости рисунка, параллельно поверхностям щелей. В результате действия магнитного поля часть альфа-частиц, проходящих через щели, отклонялась вправо или влево в зависимости от направления поля и поглощалась на их стенках. В результате уменьшалась ионизация, производимая альфа-частицами в камере *V*. Камера *V* и система щелей *G* были герметично воском припаяны к свинцовой пластине *P*, так что альфа-частицы могли проникать из *G* в *V* только через окно из алюминиевой фольги. Кроме того, через всю систему сверху вниз прокачивался водород со скоростью 2 см³/с (который проходил через поры в алюминиевой фольге), чтобы вверх в сосуд *V* не проникал радиоактивный газ радон (постоянно накапливающийся в результате распада радия) – его альфа-частицы полностью замаскировали бы эффект ионизации от малого количества альфа-частиц радия. Для этой работы, благодаря поддержке М. Кюри, Резерфорд получил образец радия с активностью 19 000 распадов/с, который почти в 20 раз превосходил по активности ранее использовавшиеся препараты.

Ниже (табл. 3.3.) приведен пример результатов одного эксперимента по отклонению частиц магнитным полем (размер полюсов магнита: 1,90 × 2,50 см; индукция поля: в промежутке 8 370 Гс; коллиматор: 25 параллельных пластин длиной 3,70 см, шириной 0,70 см, ширина промежутка между пластинами – 0,42 см; расстояние до слоя радия – 1,4 см).

Таблица 3.3

Отклонение частиц магнитным полем

№ п/п	Скорость разрядки электроскопа	Показатель, В/мин.
1	Без магнитного поля	8,33
2	Магнитное поле включено	1,72
3	Радий закрыт пластинкой слюды толщиной 0,01 см, полностью поглощающей альфа-лучи, но пропускающей бета- и гамма-лучи, без магнитного поля	0,93
4	Радий закрыт слюдой, магнитное поле включено	0,92

Разница (1) и (3) в 7,40 В/мин. дает скорость разрядки электроскопа в результате ионизации водорода в камере V только за счет альфа-лучей. Разница (2) и (3) в 0,79 В/мин. обусловлена альфа-лучами, не отклоненными магнитным полем. Таким образом, число альфа-лучей, которые не отклонились магнитным полем на достаточную величину, чтобы поглотиться на стенках, составило около 11 % от их полного числа. Малая разница между (3) и (4) обусловлена слабой ионизацией бета-лучами (они полностью отклоняются таким магнитным полем). Резерфорд полагал, что, возможно, ионизация за счет бета-лучей на самом деле выше, однако даже остаточного поля в магните после выключения тока достаточно для полного их отклонения. (4) отражает суммарный эффект от ионизации гамма-лучами и от естественного тока в водороде между пластинами электроскопа (за счет которого электроскоп постепенно разряжается).

На рис. 3.7 слева изображено распределение рассеянных магнитных полей вблизи полюсов магнита, эти поля убывают по мере удаления от полюсов. Резерфорд измерил зависимость эффектов от величины поля, перемещая полюса магнита относительно многощелевой системы. Оказалось, что число отклоненных альфа-частиц пропорционально величине поля. Эта зависимость продемонстрирована на рис. 3.7 справа. На нем 89 % отклоненных частиц соответствуют полю (ось абсцисс) в 8370 Гс.

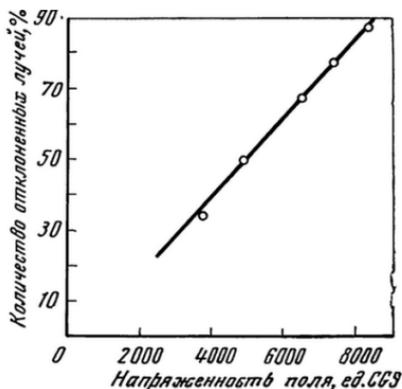
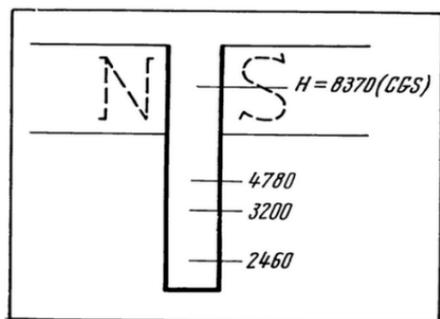


Рис. 3.7. Распределение рассеянных магнитных полей вблизи полюсов магнита (слева); зависимость числа отклоненных альфа-частиц от величины поля (справа)

А теперь давайте определим минимальный радиус кривизны траектории (рис. 3.8), при котором частица еще пройдет через щель шириной Δ и длиной L .

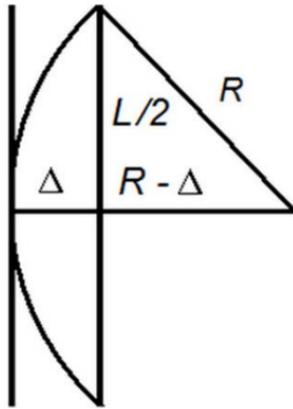


Рис. 3.8. Определение минимального радиуса кривизны траектории

Из рисунка видно, что частицы с радиусом кривизны траектории, большим R , то есть с менее изогнутой траекторией, пройдут через щель, а частицы с радиусом кривизны траектории, меньшим R (с более изогнутой траекторией), попадут на стенку щели и в ней поглотятся. Из прямоугольного треугольника по теореме Пифагора следует:

$$R^2 = \frac{L^2}{4} + (R - \Delta)^2 = \frac{L^2}{4} + R^2 - 2R\Delta + \Delta^2.$$

В результате, подставляя $\Delta = 0,055$ см, $L = 4,5$ см, получим:

$$R = \frac{L^2}{8\Delta} + \frac{\Delta}{2} = \frac{4,5^2}{8 \cdot 0,055} + \frac{0,055}{2} = 46 \text{ см.}$$

Заметим, что вклад $\Delta/2$ ничтожно мал. В верхней формуле сразу можно было пренебречь слагаемым Δ^2 , поскольку оно мало по сравнению с L^2 и R^2 .

Оказалось, что альфа-частицы полностью поглощаются на стенках системы щелей шириной $\Delta = 0,55$ мм в однородном поле 8 400 Гс, простирающемся на всю длину $\Delta L = 4,5$ см пластин. Это означает, что для поля в 8 400 Гс радиус кривизны для самых быстрых частиц равен $R = 46$ см (поскольку ионизация в камере прекратится только тогда, когда отклонятся самые быстрые частицы), то есть величина $BR \approx 390\,000$ Гс · см.

Для того чтобы определить направление отклонения альфа-частиц в магнитном поле, Резерфорд с одной стороны перекрыл щели на выходе латунными пластинками (рис. 3.9), тогда в измерительный объем могут попасть только частицы, отклоненные вправо, а те, что отклонятся влево, пол-

ностью поглощаются. Меняя магнитное поле, Резерфорд определил направление отклонения и обнаружил, что заряд альфа-частиц противоположен заряду электрона. Это и было первым прямым доказательством того, что заряд альфа-частицы положителен. Первым, кто предположил, что альфа-частицы несут положительный заряд, был Дж. В. Стретт (*Strutt*) в 1900 г., в 1902 г. ту же мысль высказал У. Крукс, однако в то время было не ясно, несут ли альфа-частицы вообще какой-либо заряд, поскольку они не отклонялись магнитным полем. Само название альфа-частицам было дано Резерфордом (в совместной с А. Е. Гриером статье) в мае 1902 г. следующим образом: «Для краткости, не отклоняемые (магнитным полем) лучи от всех радиоактивных веществ будем называть альфа-лучами, а отклоняемые – бета-лучами».

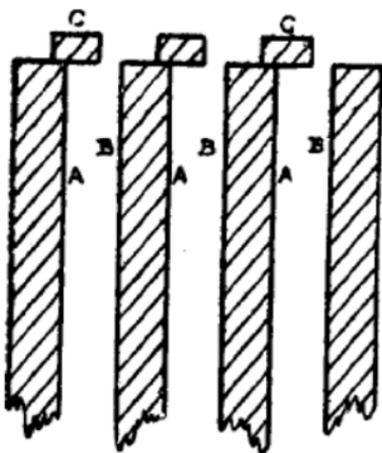


Рис. 3.9. Определение направления альфа-частиц в магнитном поле

Опыт с электрическим полем оказалось провести гораздо труднее, нежели с магнитным. Для этой цели латунные держатели пластин с вырезанными пазами были заменены на эбонитовые (эбонит – хороший изолятор), однако приложить напряжение выше 600 В к пластинам не удалось, поскольку в присутствии альфа-частиц начинается пробой в водороде.

При напряжении 600 В, ширине щелей 0,55 мм (напряженность электрического поля составила $\sim 11\,000$ В/см, или 36,4 СГС) и длине пластин 4,5 см наблюдалось отклонение всего 7 % альфа-частиц. Малая величина отклонения не позволила определить направление отклонения частиц в электрическом поле (соседние пластины подсоединялись проводниками к разным полюсам батареи, так что в соседних промежутках поля были направлены в противоположные стороны). Это значит, что, чтобы добиться

отклонения 100 % частиц, то есть того же радиуса кривизны траекторий, как и в магнитном поле, необходимо электрическое поле в 14 раз сильнее, то есть $E_R \sim 520$ ГС.

Сравнивая с магнитным полем, можно оценить скорость альфа-частиц: $v = cE_R/B = 3 \cdot 10^{10} \cdot 520/8400 \approx 1,9 \cdot 10^9$ см/с, что совпадает с нашими предыдущими оценками.

Теперь можно определить величину q/M отношения заряда к массе альфа-частицы, используя полученные выше величины:

$$\frac{q}{M} = \frac{v c}{B R}.$$

Подставляя $R = 46$ см, $B = 8400$ Гс, $v = 1,9 \cdot 10^9$ см/с, получаем $q/M = 1,5 \cdot 10^{14}$ (ГС).

Для протона из современных табличных значений заряда $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл (СИ) $= 4,8 \cdot 10^{-10}$ (ГС) и массы $m_p = 938,3$ МэВ/ c^2 $= 1,67 \cdot 10^{-24}$ г имеем $e/m_p = 2,87 \cdot 10^{14}$. Таким образом, принимая заряд альфа-частицы $q = Ze$, а ее массу $M = Am_p$, из эксперимента Резерфорда $q/M = Z/A \cdot e/m_p$ следует, что величина Z/A для альфа-частицы равна:

$$\frac{Z}{A} = \frac{q}{M} \frac{m_p}{e} \approx 0,5.$$

Для первого эксперимента это весьма неплохо согласуется с хорошо известной сейчас величиной, близкой к 1/2. Заметим еще, что величина q/M приблизительно в тысячу раз меньше соответствующей величины для электрона, поэтому если заряд альфа-частицы не слишком отличается от заряда электрона, то она оказывается существенно тяжелее электрона. Это был первый и очень важный шаг на пути разгадки тайны альфа-лучей.

Следующим шагом нужно было определить заряд альфа-частицы. Эту задачу решили Резерфорд и Гейгер.

3.2.4. Определение заряда альфа-частицы. Опыт Резерфорда – Гейгера

Для определения заряда одной альфа-частицы экспериментально определялось суммарное количество электричества, переносимого всем излучением крупинки радия за определенное время, и количество альфа-частиц, испускаемых радием за это же время. Самым сложным было зарегистрировать каждую альфа-частицу поштучно. К этому моменту уже хорошо был известен эффект сцинтилляций, создаваемых альфа-частицами на соответствующем экране, но его нельзя было применить для подсчета числа

альфа-частиц, пока не было бы доказано, что каждая альфа-частица производит сцинтилляцию; до тех пор количество сцинтилляций можно было использовать лишь как оценку снизу.

Для независимого подсчета альфа-частиц Резерфордом совместно с Гейгером в 1908 г. был разработан специальный метод счета альфа-частиц, основанный на их ионизирующем действии, и создан специальный прибор (известный как счетчик Гейгера). Внутри бронзового цилиндра длиной около 60 см находился разреженный воздух. По оси цилиндра была натянута тонкая проволока. Проволока соединялась с одним полюсом батареи, а поверхность цилиндра – с другим, при этом приложенное напряжение порядка 1 000 В готово было вот-вот вызвать электрический разряд. Попавшая в цилиндр альфа-частица производила ионизацию воздуха, образовавшиеся при этом ионы, благодаря соударениям, усиливали ионизацию примерно в 2 000 раз, в результате ток через прибор резко возрастал, потому появилась возможность считать альфа-частицы поштучно. Для того чтобы в цилиндр проникали отдельные частицы, крупинка радия помещалась в дальний конец узкой стеклянной трубки длиной около 4,5 м, так что действительно лишь малая доля альфа-частиц, вылетающих из радия в разные стороны, попадала в цилиндр. В своей статье, вышедшей в трудах Королевского общества Лондона в 1908 г., названной «Электрический метод счета числа альфа-частиц из радиоактивных веществ», Резерфорд и Гейгер описывают конструкцию такого счетчика. Главный результат состоит в том, что количественно оба метода счета альфа-частиц, сцинтилляционный и электрический, дают одинаковые результаты. Таким образом, ученые определили, сколько альфа-частиц излучает единица массы радия в единицу времени.

Используя этот результат и определив заряд, перенесенный излученными альфа-частицами за известный промежуток времени, можно определить заряд одной альфа-частицы. Резерфорд и Гейгер провели соответствующие измерения и опубликовали результаты в том же номере трудов Королевского общества, сразу за статьей о счете альфа-частиц. Полученный ими заряд альфа-частицы превышал общепринятые на тот момент представления о заряде e , переносимом атомом водорода, в 2,5–3 раза. Исходя из того что e – фундаментальная единица электричества, они заключают, что заряд альфа-частицы – $2e$ или $3e$, но далее приводят аргументы в пользу того, что на самом деле заряд равен $2e$. Поэтому Резерфорд и Гейгер заключают, что альфа-частица становится атомом гелия после того, как потеряет свой положительный заряд.

3.2.5. Альфа-частицы представляют собой дважды ионизированные атомы гелия. Опыт Резерфорда – Ройдса

В 1908 г. Резерфорду была присуждена Нобелевская премия по химии «за проведенные им исследования в области распада элементов в химии радиоактивных веществ». В своей вступительной речи от имени Шведской королевской академии наук К. Б. Хассельберг указал на связь между работой, проведенной Резерфордом, и работами Дж. Дж. Томсона, Анри Беккереля, Пьера и Марии Кюри. «Открытия привели к потрясающему выводу: химический элемент... способен превращаться в другие элементы», – сказал Хассельберг. В своей нобелевской лекции Резерфорд отметил: «Есть все основания полагать, что альфа-частицы, которые так свободно выбрасываются из большинства радиоактивных веществ, идентичны по массе и составу и должны состоять из ядер атомов гелия. Мы, следовательно, не можем не прийти к заключению, что атомы основных радиоактивных элементов, таких, как уран и торий, должны строиться, по крайней мере частично, из атомов гелия».

Позже, в 1909 г., Резерфорд и Томас Ройдс сумели экспериментально показать, что по своей природе альфа-частицы представляют собой дважды ионизированные атомы гелия (*Rutherford E., Royds T. Phil. Mag. 1909. V. 17. P. 281-6*).

Достаточно большое количество радиоактивного газа радона – эманации радия – вводилось в стеклянную трубку 2 (см. рис. 3.10, взятый из статьи Э. Резерфорда и Т. Ройдса, опубликованной в 1909 г. в «Журнале философии»), настолько тонкую, что большинство альфа-частиц свободно проникало сквозь нее. Эта трубка помещалась внутрь более широкой трубки 3, к верхней части которой присоединялась небольшая вакуумная трубка 1 с впаянными в нее электродами. В откачанную трубку 3 снизу вводилась ртуть, альфа-частицы, скопившиеся в трубке 3, образовывали газ. Поднимая ртуть, этот газ сжимали и часть его переводили в вакуумную трубку 1. Возбудив там газовый разряд, можно было исследовать его спектральный состав.

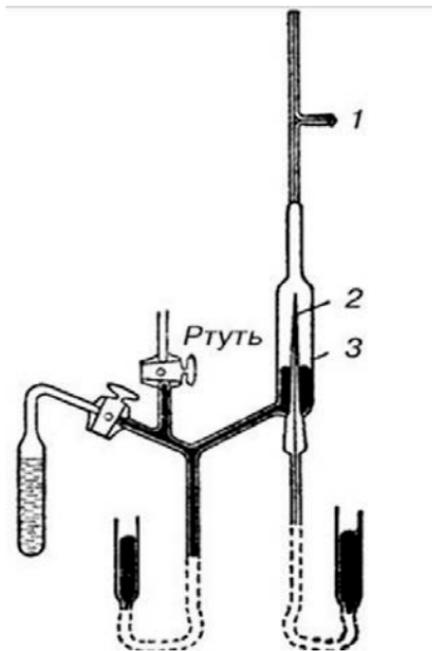


Рис. 3.10. Опыт Резерфорда – Ройдса

Любопытно, что лишь через два дня появились первые результаты: была обнаружена желтая (самая яркая) линия спектра гелия. Через шесть дней наблюдали уже весь спектр гелия. В трубке был гелий. Но, может быть, он попал в трубку 2 по недосмотру вместе с радоном, а оттуда проник в трубки 3 и 1? Контрольный опыт дал на этот вопрос отрицательный ответ. Точно в такой же прибор (в трубку 2) Резерфорд помещал не радон, а чистый гелий. Однако через несколько дней в трубке 1 линии гелия не появлялись. Гелий не мог пройти через стеклянные стенки трубки 2 в трубку 3. Альфа-частицы же легко проходили через стекло и накапливались в трубке 3, а затем концентрировались в трубке 1, где и подвергались спектральному анализу, давая линии гелия. Итак, гелий сначала был открыт в спектре солнечных лучей, затем в минералах и, еще позже, Резерфордом в радиоактивном распаде тория, урана и радия. После этих опытов внимание многих ученых было привлечено к гелию. Наконец, из опытов по отклонению альфа-частиц в магнитном поле стало возможным определить их массу.

3.3. Опыты Гейгера – Марсдена – Резерфорда по рассеянию альфа-частиц атомами. Открытие ядра атома

Итак, благодаря опытам Резерфорда и его сотрудников стали известны природа, заряд и масса альфа-частицы. Кроме того, Резерфорд первый догадался, что рассеяние альфа-частиц на веществе можно использовать для исследования строения самих атомов, из которых это вещество состоит. В результате у физиков появился мощный и принципиально новый инструмент для исследования структуры вещества. Сейчас строятся мощные протонные и электронные ускорители высоких и сверхвысоких энергий, интенсивные источники нейтронов, рентгеновских и гамма-лучей, и все это для того, чтобы, рассеивая эти частицы на веществе, атомах, ядрах или сталкивая их друг с другом, исследовать самую глубокую структуру вещества и самих элементарных частиц.

Результаты опытов по рассеянию альфа-частиц произвели переворот в физике. Резерфорд открыл атомное ядро и тем самым основал новую науку – ядерную физику.

3.3.1. Модель Томсона

К началу первых экспериментов Резерфорда по рассеянию альфа-частиц в веществе (1908), вместе с молодыми сотрудниками Х. Гейгером и Э. Марсденом, сложилось следующее представление о строении атома.

Атом, модель которого была предложена в 1897 г. учителем Резерфорда – Дж. Дж. Томсоном, напоминал пудинг с изюмом. Изюминками были электроны, а тестом – само атомное пространство (далее различные модели атома в дорезерфордовский период мы обсудим подробнее).

Поскольку преобладающая доля массы атома сосредоточена в его положительно заряженной части, Дж. Дж. Томсон принял, что атом представляет собой сферическое распределение положительного заряда радиусом примерно 10^{-8} см, а на его поверхности находятся электроны, удерживаемые упругими силами, позволяющими им колебаться (рис. 3.11). Суммарный отрицательный заряд электронов в точности компенсирует положительный заряд, так что атом электрически нейтрален. Колебания относительно положения равновесия могут происходить лишь с определенными частотами, которым соответствуют узкие спектральные линии, наблюдающиеся в газоразрядных трубках. Электроны, которые находятся на поверхности, можно довольно легко выбить с их позиций, в результате чего возникают положительно заряженные ионы. X-лучи соответствуют очень высоким обертонам основных колебаний электронов. Альфа-частицы, возникающие при радиоактивных превращениях, – это часть положительной сферы, выбитая из нее в результате какого-то энергичного разрывания атома.

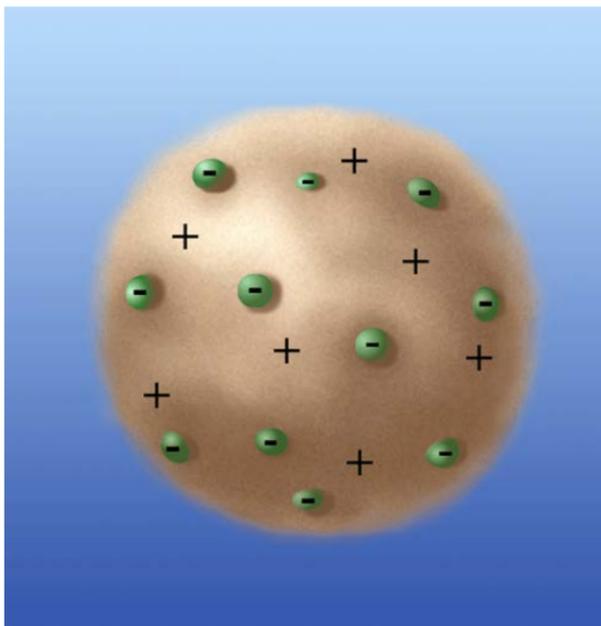


Рис. 3.11. Модель атома Томсона

Однако модель Томсона вызывала ряд возражений. Одно из них было связано с тем, что, как обнаружили спектроскописты, измерявшие линии испускания, частоты этих линий не являются простыми кратными низшей частоты, как должно быть в случае периодических колебаний заряда. Вместо этого они сближаются с увеличением частоты, как если бы стремились к пределу. Исходя из модели атома Томсона было также крайне трудно объяснить испускание атомами рентгеновского или гамма-излучения.

Затруднения в модели атома Томсона вызвало и отношение e/m заряда к массе для атомов, потерявших свои электроны (ионов – «каналовых лучей»). Самый простой атом – это атом водорода с одним электроном и сравнительно массивной сферой, несущей один положительный заряд. Значительно раньше, в 1815 г., У. Праут высказал предположение, что все более тяжелые атомы состоят из атомов водорода, и было бы понятно, если бы масса атома возрастала пропорционально числу электронов. Однако измерения показали, что отношение заряда к массе для разных элементов неодинаково. Например, масса атома неона примерно в 20 раз больше массы атома водорода, тогда как заряд составляет лишь 10 единиц положительного за-

ряда (у атома неона 10 электронов). Дело обстояло так, как если бы положительный заряд имел переменную массу или же электронов было действительно 20, но 10 из них находились внутри сферы.

Затем возникла еще одна трудность. В 1903 г. Ф. Ленард (1862–1947) ставил опыты с прохождением пучка быстрых электронов сквозь тонкие металлические фольги. В модели атома Томсона почти все пространство заполнено веществом (положительно заряженной частью атома), а потому можно было думать, что сквозь фольгу сможет проникать лишь очень мало электронов. Ленард же обнаружил, что сквозь фольгу проходят почти все электроны. Хотя в эксперименте имелись трудности, связанные с малой массой бомбардирующих частиц, Ленард выдвинул предположение, что масса атома сосредоточена в «динамиде» – его центральной области, значительно меньшей, чем предполагалось.

3.3.2. Открытие ядра атома в опытах по рассеянию альфа-частиц

Решающий эксперимент, совершенно изменивший представления о пространственной структуре атома, был проведен Э. Резерфордом и его сотрудниками Х. Гейгером (1882–1945) и Э. Марсденом (1889–1970). Вместо электронов они использовали альфа-частицы, так как благодаря своей большей массе (в 7 350 раз больше массы электрона) эти частицы не претерпевают заметного отклонения при столкновении с атомными электронами, что позволяет регистрировать только столкновения с положительной частью атома. В качестве источника альфа-частиц был взят радий, а частицы, претерпевавшие рассеяние в тонкой металлической фольге, например золотой, регистрировались по «сцинтилляционному» вспышкам на экране из сульфида цинка, находившемся в затемненной комнате.

Исследовать рассеяние альфа-частиц Резерфорд начал еще в Канаде. Он обнаружил, что тонкие слюдяные пластинки способны отклонять альфа-лучи на довольно большие углы, и сделал из этого вывод о достаточно больших электрических полях, которые должны быть в атомах. Слюдяные пластины были стандартным элементом в экспериментальных установках Резерфорда; через маленькое слюдяное окно велись наблюдения, также слюда использовалась, чтобы отфильтровать бета- и гамма-лучи от альфа-лучей. Поэтому неудивительно, что рассеяние альфа-частиц в слюде было замечено. Резерфорд и Гейгер явно указывают на него в статье про счет альфа-частиц в «Трудах Королевского общества». Затем Гейгер исследует рассеяние альфа-частиц не на слюдяных пластинках, а в воздухе и на тонких слоях золотой и алюминиевой фольги. Он указывает, что они отклоняют альфа-частицы на заметные углы. Во всех опытах Гейгер получает наиболее вероятные углы отклонения порядка нескольких градусов. Он получает почти линейную зависимость угла рассеяния от толщины (за исключением участка

очень маленьких толщин). Из исследований рассеяния для разных металлов Гейгер устанавливает, что наиболее вероятный угол рассеяния на одном атоме примерно пропорционален атомному весу вещества.

Но с самого начала опытов по рассеянию Гейгер наблюдал однократные случаи рассеяния частиц на сравнительно большие углы, много большие, чем средний угол рассеяния. Считая, что рассеяние частиц на такие большие углы в мишени невозможно, они с Марсденом пришли к выводу, что это может объясняться рассеянием частиц на дефектах стенок стеклянной трубки, по которой альфа-частицы летели от источника к мишени, и поэтому уже к мишени они подходят под большим углом. Решение проблемы было достаточно простым: они сузили пучок на входе в трубку так, что альфа-частицы не летели теперь поблизости от стенок и не могли рассеиваться на их дефектах. Ученые, конечно, проинформировали Резерфорда об этой проблеме и их решении и продолжили исследование рассеяния на малые углы.

Резерфорд же задумался над происходящим. Рассеяние частиц на дефектах стенок выглядело правдоподобным, но была также другая возможность. Поэтому Резерфорд предложил Марсдену, который был в то время лишь лаборантом, исследовать возможность прямого отражения альфа-частиц назад от металлической фольги. Марсден понимал, что ожидается отрицательный результат, но все равно взялся за тщательную проверку и с удивлением обнаружил, что альфа-частицы действительно рассеиваются и на большие углы. Потом Марсден вспоминал, как он с гордостью докладывал Резерфорду результаты экспериментов. Схема опыта приведена на рис. 3.12.

Статья Резерфорда, вышедшая в 1911 г., в которой он высказывал объяснение опытов Гейгера и Марсдена, появилась лишь почти через два года после публикации эксперимента. Резерфорд сразу утверждает, что такие большие отклонения можно объяснить только результатом одиночного столкновения с атомом, поскольку шансы второго столкновения с большим отклонением совсем малы. Поэтому в атомах должны присутствовать очень большие электрические поля. И далее, во введении, обсуждая модель атома, предложенную Дж. Дж. Томсоном, Резерфорд указывает, что рассеяние быстрых частиц атомами – это один из самых многообещающих методов исследования структуры атома. В основной части работы Резерфорд сначала рассматривает простейшую модель атома: центральный точечный заряд одного знака и распределенный по окружающей сфере заряд другого знака. Сразу же Резерфорд оговаривается, что вопрос о стабильности такого атома пока не следует обсуждать, так как он, очевидно, зависит от деталей структуры и движения составляющих. Далее он указывает, что частицы с достаточно большой энергией могут подходить к центральному заряду намного ближе, чем расстояние порядка размера атома.

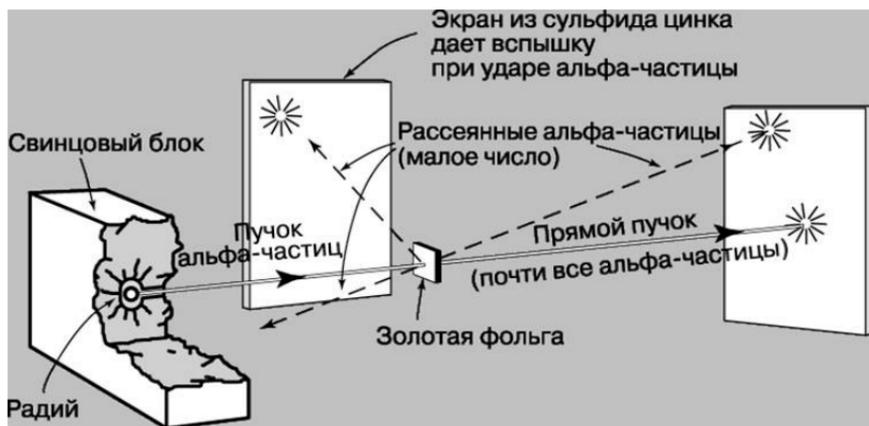


Рис. 3.12. Рассеяние альфа-частиц. Используя прибор такого типа с альфа-частицами, испускаемыми радием, Э. Резерфорд с сотрудниками установил, что, хотя основная часть частиц проходит сквозь золотую фольгу, на большие углы рассеивается больше частиц, чем должно быть в соответствии с томсоновской моделью атома. Это было истолковано как указание на то, что в центре атома находится малое ядро

Столь большие отклонения можно было объяснить лишь тем, что положительная «сердцевина» атома значительно меньше размеров его электронной структуры, и, следовательно, альфа-частицы могут очень близко подходить к этой малой положительной сердцевине, встречая при этом очень большие кулоновские силы. Опыты Резерфорда убедительно показали, что весь атом, кроме очень малой массивной сердцевины, или «ядра», как и предполагал Ленард, почти полностью пуст. Исходя из полученных им экспериментальных данных Резерфорд заключил, что диаметр ядра атома золота составляет не более $6 \cdot 10^{-13}$ см – значение, довольно близкое к современному. Позднее Резерфорд признался, что сообщение Марсдена произвело на него потрясающее впечатление: «Это было почти неправдоподобно, как если бы вы выстрелили пятнадцатифунтовым снарядом в кусок папиросной бумаги, и снаряд отскочил бы обратно и поразил вас».

Резерфорду удалось, упрощенно рассматривая ядро как точечный центр рассеяния, на основе только электростатики и механики Ньютона вывести формулу для углового распределения рассеянных частиц, которая носит его имя. Эти выражения получили количественное подтверждение для широкого диапазона углов и разных рассеивающих материалов и позволили измерить заряд ядра.

Резерфордовская, или ядерная, модель атома, вытеснив томсоновскую модель, явилась важным этапом на пути создания квантовой механики.

Детальные эксперименты, выполненные Гейгером и Марсденом в 1913 г., не оставили и тени сомнения в том, что картина атома с малым массивным ядром в центре электронной структуры значительно больших размеров верна не только качественно, но и количественно. Некоторые детали, перенесенные из томсоновской модели, такие как существование в ядре электронов, позднее также были отброшены.

Таким образом, оказалось, что атомы (а следовательно, и все вещества) состоят практически из «пустоты» – вся масса атома сосредоточена в объеме $\sim 10^{-36}$ см³ (диаметр порядка 10^{-12} см), а практически пустая электронная «оболочка» простирается на расстояния 10^{-8} см и занимает соответственно объем $\sim 10^{-24}$ см³, то есть на 12 порядков (!) больше, а масса ее почти в 2 000 раз меньше массы ядра.

3.3.3. Как же можно представить масштабы размеров этих «частиц»

Размер атома, напомним, составляет приблизительно 10^{-8} см. Возьмем каплю воды, например, размером в 1 мм и увеличим ее в 10 000 раз, получим каплю диаметром в 10 м. При этом частички примесей размерами в 1 мкм превратятся в шары размером в 1 см (в том числе увидим микроорганизмы, которые будут двигаться при таком увеличении). Частички примесей будут непрерывно дрожать, хаотически передвигаться. Это так называемое броуновское движение, которое возникает из-за того, что в эти частички непрерывно стучаются сотни атомов с разных сторон. Именно это и увидел в микроскоп Броун (правда, максимальное увеличение оптического микроскопа около 2 000, а не 10 000, как в нашем примере, но это не принципиально), что и явилось первым непосредственным наблюдением движения атомов.

Если теперь каплю увеличить еще в 10 000 раз, то есть она станет величиной в 100 км (в 10 раз больше самой высокой на Земле горы), то мы увидим молекулу воды, которая состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода, с размерами около 1 см.

Величина характерного размера атома 10^{-8} см имеет собственное название – ангстрем: $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$. Атом же состоит из ядра, размер которого 10^{-12} см (для достаточно тяжелых атомов), то есть еще в 10 000 раз меньше. Что это означает?

А то, что, если мы увеличим нашу картинку еще в 10 000 раз, наш атом величиной в 1 см превратится в стометровый объект – совершенно пустой. В центре его находится ядро размером в 1 см, в котором сосредоточена практически вся масса атома, поскольку электроны почти в 2 000 раз легче протонов (в 2 килограммах вещества на долю электронов приходится всего 1 грамм). Следовательно, все вокруг нас, и все мы в том числе, состоим практически из пустоты. Атомы не могут сближаться более чем на 10^{-8} см, так

как это им запрещают законы квантовой механики. Само же ядро состоит, в свою очередь, из нуклонов, размер которых $\sim 10^{-13}$ см (то есть при нашем увеличении это ~ 1 мм, нуклоны в ядре плотно прижаты друг к другу ядерными силами). Эта величина тоже имеет свое название – ферми: $1 \text{ Фм} = 10^{-13}$ см (рис. 3.13 и 3.14).

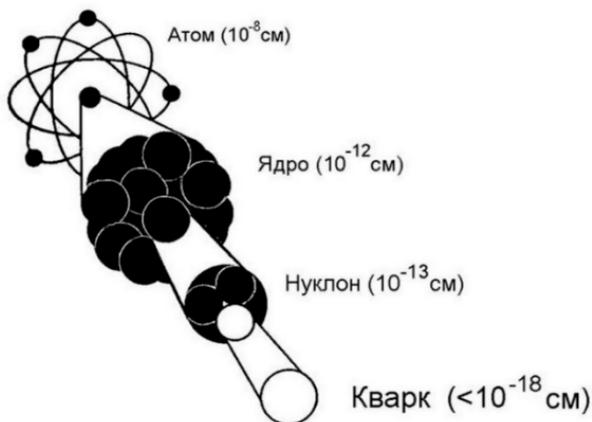


Рис. 3.13. Весьма упрощенная картина современного представления о субатомном мире



Рис. 3.14. Еще одна наглядная картина для сравнения масштабов размеров атома и ядра: небольшой мячик в центре стадиона

Возникает вопрос: а что если образовать «ядерное» вещество, сбросив все электроны и прижав ядра друг к другу, то какова будет его плотность? Мы знаем, что у воды плотность 1 г/см^3 . Одна из самых больших плотностей у урана – 19 г/см^3 (у осмия – $22,6 \text{ г/см}^3$, у платиноиридиевого сплава – $21,62 \text{ г/см}^3$). Если сбросить электроны, то радиус каждого атома уменьшится от 10^{-8} см до 10^{-12} см , то есть в 10^4 раз; а поскольку объем пропорционален R^3 ($V = 4/3\pi R^3$), то он уменьшится в 10^{12} раз, следовательно, плотность увеличится в 10^{12} раз и будет составлять $10^{12} - 10^{13} \text{ г/см}^3$, то есть $1 - 10$ млн т/см^3 .

Такова плотность ядерного вещества в ядрах всех атомов; кроме того, есть так называемые нейтронные звезды, которые состоят из одних нейтронов, вещество таких звезд имеет даже большую плотность из-за добавочного гравитационного сжатия.

При такой плотности масса Земли уместится в шар радиусом $\sim 1 \text{ км}$.

3.3.4. Камера Вильсона. Визуализация следов заряженных частиц

Камера Вильсона – один из первых в истории приборов (рис. 3.15) для регистрации следов (треков) заряженных частиц (рис. 3.16). Он был создан 19 апреля 1911 г. шотландским физиком Чарлзом Вильсоном. Принцип действия камеры использует явление конденсации перенасыщенного пара: при появлении в среде перенасыщенного пара каких-либо центров конденсации (в частности, ионов, сопровождающих след быстрой заряженной частицы) на них образуются мелкие капли жидкости. Эти капли достигают значительных размеров и могут быть сфотографированы. Источник исследуемых частиц может располагаться либо внутри камеры, либо вне ее (в этом случае частицы залетают через прозрачное для них окно). Для исследования количественных характеристик частиц (например, массы и скорости) камеру помещают в магнитное поле, искривляющее треки.

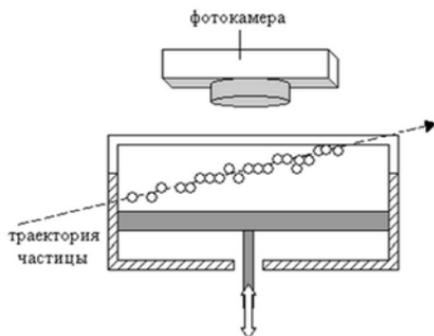
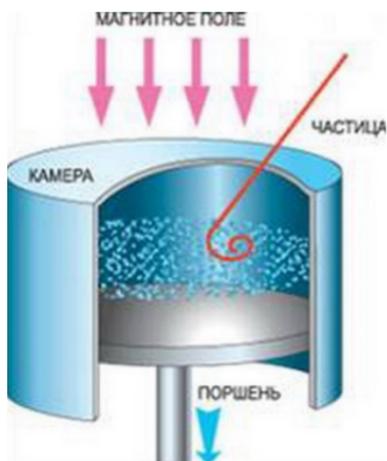


Рис. 3.15. Схема камеры Вильсона

а



б

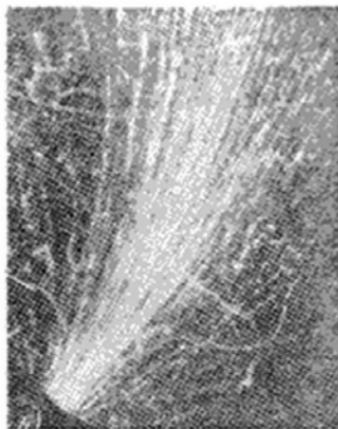


Рис. 3.16. Следы альфа- и бета-частиц в камере Вильсона. Частицы испускаются радиоактивным препаратом, помещенным в нижней части камеры: а) альфа-частицы (камера в магнитном поле 4,3 Тл, направленном перпендикулярно плоскости рисунка от нас); б) бета-частицы (магнитное поле 0,0215 Тл направлено на нас)

Камера представляла собой стеклянный цилиндр диаметром 16,5 см и высотой 3,5 см. Сверху цилиндр закрывался приклеенным зеркальным стеклом, через которое фотографировали следы частиц. Внутри находился второй цилиндр, в нем – деревянное кольцо, опущенное в воду: испаряясь с поверхности кольца, она насыщала камеру водяными парами. Вакуумный насос создавал разрежение в шаровидной емкости, соединенной с камерой трубкой с вентилем. При открывании вентиля в камере создавалось разрежение, водяные пары становились пересыщенными, и на следах заряженных частиц происходила их конденсация в виде полосок тумана (именно поэтому в зарубежной литературе прибор называется *the cloud chamber* – «туманная камера»).

С помощью этого замечательного метода мы имеем возможность наблюдать траекторию полета (след) одной-единственной альфа- или бета-частицы (см. рис. 3.16). Туманные следы существуют в камере недолго, так как воздух нагревается, получая тепло от стенок камеры, и капли испаряются. Чтобы получить новые следы, необходимо удалить имеющиеся ионы с помощью электрического поля, сжать воздух поршнем, выждать, пока воздух в камере, нагретый при сжатии, охладится, и произвести новое расширение.

Для изучения свойств альфа-частиц П. Л. Капица (в то время, когда работал у Резерфорда) предложил помещать камеру Вильсона в магнитное поле. В нем траектория заряженной частицы искривляется, причем радиус искривления зависит от импульса частицы (см. рис. 3.16а). Из его записей: «29 ноября 1922 г. Для меня сегодняшний день до известной степени исторический... Вот лежит фотография – на ней только три искривленные линии – полет альфа-частицы в магнитном поле страшной силы. Эти три линии стоили профессору Резерфорду 150 фунтов стерлингов, а мне и Эмилю Яновичу – трех с половиной месяцев усиленной работы. Но вот они тут, и в университете о них все знают и говорят. Странно: всего три искривленные линии! Крокодил (*так называли Резерфорда его студенты и сотрудники.* – В. Ф.) очень доволен этими тремя искривленными линиями. Правда, это только начало работы, но уже из этого первого снимка можно вывести целый ряд заключений, о которых прежде или совсем не подозревали, или же догадывались по косвенным фактам. Ко мне в комнату – в лабораторию – приходило много народу смотреть три искривленные линии, люди восхищались ими...»

Изучая искривленные туманные следы альфа-частиц в камере Вильсона, помещенной в очень сильное магнитное поле, удалось определить радиус круговой орбиты альфа-частицы в поле. Так как он пропорционален массе частицы, умноженной на ее скорость, и обратно пропорционален ее заряду, по известным величинам можно было довольно точно рассчитать массу альфа-частицы. Она оказалась равной $6,62 \cdot 10^{-24}$ г.

3.3.5. Движение заряженной частицы в магнитном поле. Циклотронная частота

Как, используя значения фундаментальных констант, можно вычислить, например, радиус кривизны траектории альфа-частицы в магнитном поле? Запишем выражение для радиуса кривизны в виде

$$R = \frac{Mcv}{qB} = \frac{Am_p cv}{ZeB} \equiv \frac{v}{\omega} \equiv \frac{A}{Z} \frac{v}{\omega_p}.$$

Здесь мы ввели циклотронную частоту $\omega = Ze/Am_p c$ (угловую скорость) вращения альфа-частицы по круговой орбите в магнитном поле, так что линейная скорость $v = \omega R$, $\omega = Z\omega_p/A$, где ω_p – аналогичная частота для протона:

$$\omega_p = \frac{eB}{m_p c} = \frac{e\hat{\lambda}_{cp} B}{\hbar}.$$

Здесь мы ввели так называемую комптоновскую длину волны частицы, которая связана с ее массой m следующим образом:

$$\hat{\lambda}_c = \frac{\hbar}{mc},$$

где \hbar – так называемая постоянная Планка, связывающая, например, энергию и импульс кванта электромагнитного излучения с его частотой и волновым вектором, то есть волновые и корпускулярные свойства электромагнитного излучения (также связывает волновые и корпускулярные свойства частиц). Размерность постоянной Планка – произведение энергии на время: $[\hbar] = [E][t]$, ее величина равна $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с = $6,6 \cdot 10^{-22}$ МэВ · с.

Комптоновская длина волны является очень важной и часто встречающейся в квантовой физике величиной. Ниже в табл. 3.4 приведены ее численные значения для электрона, заряженных пи-мезонов и протона.

Таблица 3.4

Массы и комптоновские длины волн для электрона, заряженных пи-мезонов и протона

$$\left[\begin{array}{c} e \\ \pi^\pm \\ p \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} m_e = 0,5110 \text{ МэВ} \\ m_{\pi^\pm} = 139,6 \text{ МэВ} \\ m_p = 938,3 \text{ МэВ} \\ = 1836 m_e = 6,7 m_{\pi^\pm} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \hat{\lambda}_{ce} = 3,86 \cdot 10^{-11} \text{ см} \\ \hat{\lambda}_{c\pi} = 1,4 \cdot 10^{-13} \text{ см} \\ \hat{\lambda}_{cp} = 2,1 \cdot 10^{-14} \text{ см} \end{array} \right]$$

Если комптоновскую длину волн умножить на элементарный заряд, получим величину с размерностью электрического или магнитного дипольного момента (произведение заряда на расстояние между разноименными зарядами). Величина

$$\mu_D = \frac{e\lambda_c}{2} = \frac{e\hbar}{2mc}$$

называется дираковским магнитным моментом частицы. В 1928 г. Дирак показал, что таким моментом должна обладать любая заряженная элементарная (то есть бесструктурная) частица со спином $1/2$ и зарядом e . Для электрона дираковский магнитный момент называется магнетоном Бора и обозначается μ_B , его величина равна $\mu_B = e\hbar/2m_e c = 5,8 \cdot 10^{-11}$ МэВ/Тл, для протона дираковский магнитный момент – ядерный магнетон $\mu_N = e\hbar/2m_p c = 3,15 \cdot 10^{-14}$ МэВ/Тл. Нетрудно заметить, что выражение **циклотронной** частоты частицы в магнитном поле теперь можно переписать в виде

$$\omega_p = \frac{eB}{m_p c} = \frac{e\lambda_{cp} B}{\hbar} = \frac{2\mu_N B}{\hbar}.$$

Для индукции магнитного поля $B = 1$ Тл имеем $\omega_p = 2 \cdot 3,15 \cdot 10^{-14} / (6,6 \cdot 10^{-22} \text{ с}^{-1}) \approx 10^8 \text{ с}$, так что при энергии альфа-частицы ~ 8 МэВ ($v \sim 2 \cdot 10^9$ см/с) и $A/Z = 2$ для радиуса кривизны ее траектории получим:

$$R = \frac{v}{\omega} = \frac{A}{Z} \frac{v}{\omega_p} \approx \frac{4 \cdot 10^9}{10^8} = 40 \text{ см}.$$

Часть 4. СТРОЕНИЕ АТОМА. СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

4.1. Виды спектров

Если вещество нагреть до высокой температуры, оно начинает светиться. Это излучение представляет собой электромагнитные волны с разными длинами волн и, соответственно, частотами. Набор излучаемых длин волн (или частот) называется спектром излучения. Спектр излучения можно наблюдать, например, пропуская свет через стеклянную призму (рис. 4.1).

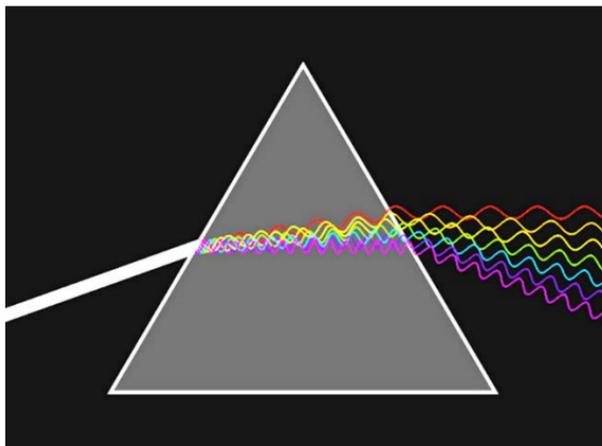


Рис. 4.1. Прозрачная призма разлагает луч белого цвета в спектр, то есть на составляющие его лучи разных длин волн и, соответственно, разного цвета

Спектр (лат. *spectrum* от лат. *specter* – видение, призрак) в физике – распределение значений физической величины (обычно энергии, частоты или массы). Графическое представление такого распределения называется спектральной диаграммой. Обычно под спектром имеется в виду электромагнитный спектр, то есть спектр длин волн, частот или энергий квантов, например, видимого света.

В научный обиход термин «спектр» ввел Ньютон в 1671–1672 гг. для обозначения многоцветной полосы, похожей на раду, которая получается при прохождении солнечного луча через треугольную стеклянную призму.

Ньютон заложил основы оптической спектроскопии: в труде «Оптика», вышедшем в 1704 г., он описал все три используемых и сейчас метода разложения света – преломление, интерференцию и дифракцию, а его призма с коллиматором, щелью и линзой была первым спектроскопом.

По характеру распределения значений длины волны (или частоты) спектры могут быть непрерывными (сплошными, рис. 4.2), дискретными (линейчатыми, рис. 4.3), а также представлять комбинацию (наложение) дискретных и непрерывных спектров (рис. 4.4).



Рис. 4.2. Радуга (сплошной спектр)



Рис. 4.3. Оптический линейчатый эмиссионный спектр азота

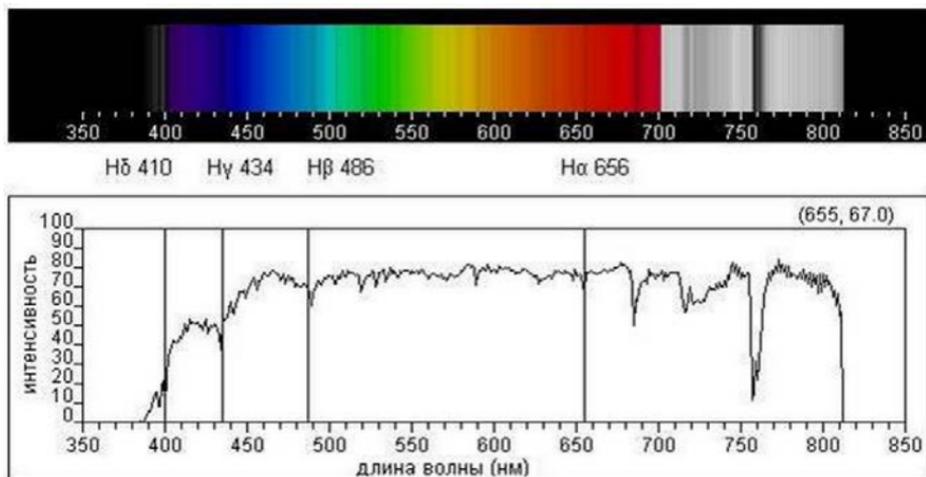


Рис. 4.4. Два представления оптического спектра: *сверху* «естественное» (видимое в спектроскопе), *снизу* – как зависимость интенсивности от длины волны. Показан *комбинированный спектр* (где на сплошной спектр накладываются линии поглощения) излучения Солнца. Отмечены линии поглощения бальмеровской серии водорода (см. далее)

Через 100 лет после Ньютона англичанин Уильям Волластон в 1802 г. наблюдал темные линии в солнечном спектре, но не придал своим наблюдениям значения. В 1814 г. линии поглощения независимо обнаружил и подробно описал немецкий ученый Йозеф Фраунгофер, но не смог объяснить их природу. В общей сложности Фраунгофер описал свыше 500 линий в солнечном спектре. Он установил, что линии эти не случайны и всегда присутствуют в спектре Солнца на строго определенных местах (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Солнечный спектр с фраунгоферовыми линиями поглощения

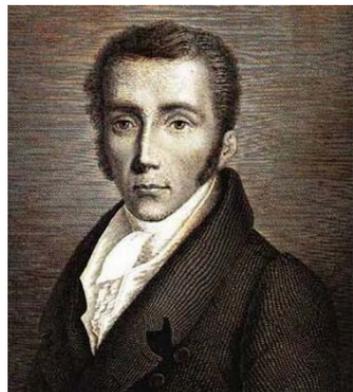
Линии эти, получившие название фраунгоферовых, не имели удовлетворительного объяснения вплоть до открытия закона Кирхгофа.

Наибольшей простотой отличается излучение изолированных атомов, например атомов одноатомных газов или паров некоторых металлов. Их спектры представляют собой набор дискретных спектральных линий разной

интенсивности, соответствующих разным длинам волн. Такие спектры называют линейчатыми (см. рис. 4.3)

Йозеф Фраунгофер (*Joseph Fraunhofer*; 1787–1826) – немецкий физик, знаменитый оптик.

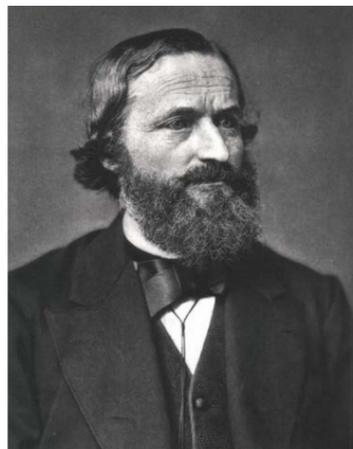
С 1823 г. – хранитель физического кабинета Мюнхенского университета и член Баварской академии наук, с 1824 г. – член Академии «Леопольдина». Усовершенствовал технологию изготовления больших ахроматических объективов, изобрел окулярный микрометр и гелиометр. Изучая показатели преломления различных сортов стекла, в 1814 г. открыл и описал линии поглощения в солнечном спектре (фраунгоферовы линии). В 1821 г. впервые применил дифракционную решетку для изучения спектров. Предложил метод наблюдения дифракции света в параллельных лучах.



В 1854 г. Кирхгоф и Бунзен начали изучать спектры пламени, окрашенного парами металлических солей, и в результате ими были заложены основы спектрального анализа, первого из инструментальных спектральных методов – одних из самых мощных методов экспериментальной науки.

Густав Роберт Кирхгоф (*Gustav Robert Kirchhoff*; 1824–1887) – один из великих физиков XIX в.

С 1842 по 1846 г. изучал математику и физику в Кенигсбергском университете, а в 1847 г. уже выступил в качестве приват-доцента в Берлине; в 1850–1854 гг. в качестве экстраординарного профессора читал лекции в Бреславле, затем до 1874 г. исполнял должность ординарного профессора в Гейдельберге, откуда в 1875 г. перешел в Берлин; в 1875 г. избран членом Берлинской академии наук, с 1862 г. состоял членом корреспондентом Санкт-Петербургской академии наук.



В результате Кирхгоф установил общий закон, согласно которому линии поглощения атомов точно соответствуют их линиям испускания. Согласно этому закону линии Фраунгофера есть не что иное, как линии поглощения паров различных металлов, расположенных между источником

сплошного спектра (яркой поверхностью Солнца, называемой фотосферой) и спектральным прибором. Пары эти составляют атмосферу (хромосферу) Солнца, менее плотную и менее горячую, чем область фотосферы. Таким образом, спектр Солнца дает сведения о спектре поглощения этих паров.

Пользуясь законом Кирхгофа и сравнивая положение линий Фраунгофера с линиями испускания различных элементов, можно было установить, какие элементы входят в состав поглощающих паров. Таким образом, удалось установить состав атмосферы, окружающей Солнце, а следовательно, и наличие ряда элементов, входящих в состав Солнца.

Необходимо отметить, что спектральный анализ по спектрам поглощения паров имеет для астрономии не меньшее значение, чем анализ по спектрам испускания, ибо позволяет анализировать состав тел, испускающих сплошной спектр, но окруженных атмосферой из паров элементов.



Роберт Вильгельм Бунзен (*Robert Wilhelm Bunsen*; 1811–1899) – знаменитый немецкий химик-экспериментатор.

Наиболее важное и замечательное открытие Бунзена, давшее для науки столько богатых результатов и сделанное им в сообществе с его другом Кирхгофом (1860 г.), составляет спектральный анализ, с помощью которого, как самим Бунзеном, так и другими химиками, было открыто немало новых редких элементов, встречающихся в природе лишь в очень малых количествах (рубидий, цезий и др.). Среди тех, кто учился и работал у Р. В. Бунзена в Гейдельберге в 1850-х – начале 1860-х гг., были Д. И. Менделеев, К. А. Тимирязев, Д. А. Лачинов, А. Г. Столетов и многие другие выдающиеся русские ученые эпохи.

Спектроскоп Кирхгофа – Бунзена изображен на рис. 4.6.

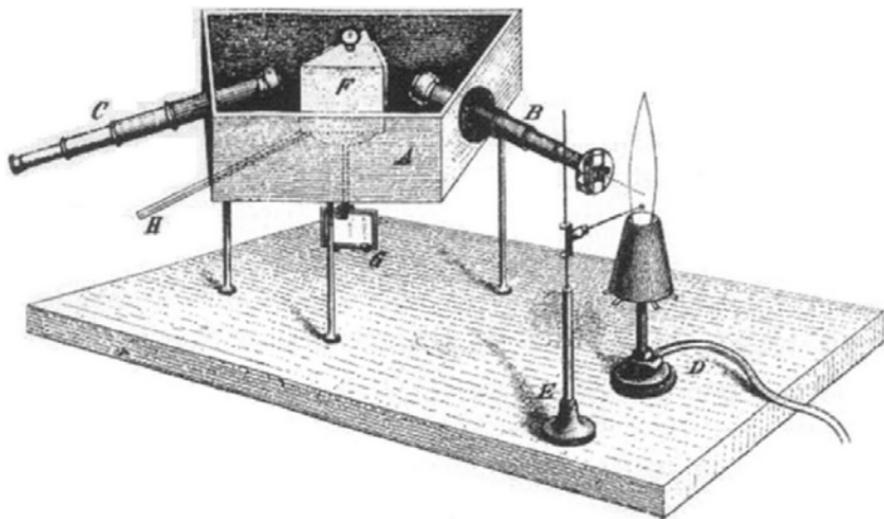


Рис. 4.6. Спектроскоп Кирхгофа – Бунзена (1860)

В своей статье «О фраунгоферовых линиях», опубликованной в журнале «Ежемесячные сообщения Берлинской академии наук» в 1859 г., Кирхгоф писал: «В связи с выполненным мною совместно с Бунзеном исследованием спектров окрашенных пламен, благодаря которому стало возможным определить качественный состав сложных смесей по виду их спектров в пламени паяльной лампы, я сделал некоторые наблюдения, приводящие к неожиданному выводу о происхождении фраунгоферовых линий и позволяющие по ним судить о вещественном составе атмосферы Солнца и, возможно, также ярких неподвижных звезд...»

4.2. Линии Бальмера в спектре атома водорода

Атом водорода – простейший из атомов, он состоит всего из одного протона (ядра) и одного электрона. Поэтому линейчатый спектр атома водорода тоже наиболее прост. Именно с изучения этого спектра начала свой путь оптическая спектроскопия – учение о спектрах атомов, молекул, веществ в различных агрегатных состояниях.

Как мы уже говорили, Й. Фраунгофер впервые подробно описал знаменитые теперь фраунгоферовы темные линии поглощения в солнечном спектре (в том числе и линии, принадлежащие водороду), которые открыл в 1814 г., изучая показатели преломления различных сортов стекла. Они возникают, когда излучение Солнца проходит сквозь газы, образующие его хро-

мосферу. В линиях Фраунгофера обнаружилось всего 4 линии, принадлежащие спектру водорода, которые впоследствии стали называться линиями H_α , H_β , H_γ , и H_δ (см. рис. 4.4).

В 1885 г. И. Бальмер, учитель физики средней школы в городе Базеле (Швейцария), тщательно проанализировал снимки, полученные Фраунгофером и его последователями, и заметил следующее. Если ввести некоторое (как его назвал Бальмер, основное) число k , то длины волн этих четырех линий могут быть выражены таким образом:

$$\lambda = k \frac{n^2}{n^2 - 2^2}.$$

Здесь $n = 3, 4, 5$ и 6 . Если λ измерять в ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см} = 10^{-10} \text{ м} = 10 \text{ нм}$), то, по Бальмеру, число $k = 3\,645 \text{ \AA} = 364,5 \text{ нм}$.



Иоганн Якоб Бальмер (*Johann Jakob Balmer*; 1825–1898) – швейцарский физик и математик.

Родился в Лозанне. Учился в Базеле, Карлсруэ, Берлине. В 1849 г. получил степень доктора в Базельском университете. С 1859 г. преподавал в средней школе и в 1865–1890 гг. – в Базельском университете. Физические работы в области спектроскопии. Обнаружил закономерность в спектральных линиях атома водорода, показав в 1885 г., что длины волн линий видимой части спектра атома водорода связаны между собой простой зависимостью (формула Бальмера), которая дает возможность определить длины волн всех линий этой водородной серии (серия Бальмера). Это открытие послужило толчком для обнаружения других серий в спектре атома водорода – серий Лаймана, Пашена, Брэкетта и Пфунда. Был пионером в изучении структуры атома.

Вскоре были обнаружены другие линии в спектре поглощения водорода (сейчас известно около 30 линий только в видимой области спектра), и их длины волн тоже «укладывались» в формулу Бальмера. О точности можно судить по табл. 4.1, где приведены результаты наблюдения и вычисления длин волн (в ангстремах) первых семи линий, для которых число n изменяется от 3 до 9.

Первые семь линий серии Бальмера

Длина волны	Целые числа n						
	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda_{\text{набл.}}$	6 562,80	4 861,33	4 340,47	4 101,74	3 970,06	3 889,00	3 835,38
$\lambda_{\text{вычисл.}}$		4 861,38	4 340,51	4 101,78	3 970,11	3 889,09	3 835,43

Эти цифры показывают, что в спектроскопии вычисления производятся с необычайной точностью. До появления спектроскопических расчетов считалось, что наибольшую точность имеют вычисления в астрономии. Однако оказалось, что точность вычислений в спектроскопии не только не уступает, но в ряде случаев превосходит астрономическую точность. В настоящее время, комбинируя астрофизические и спектроскопические данные, удается даже отвечать на вопросы, насколько изменились фундаментальные константы за время эволюции Вселенной и изменяются ли они вообще.

В 1890 г. шведский физик Йоханнес Ридберг записал формулу Бальмера в «перевернутом» виде», для величины $N = 1/\lambda$ (она называется волновым числом и показывает, какое число длин волн в вакууме укладывается на единичной длине):

$$N = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, 6, \dots,$$

где λ и ν – длина волны и частота излучаемого света, c – скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с), n – целое число, а величина $R_H = 4/k$ стала называться постоянной Ридберга.

Электромагнитное излучение принято делить по частотным диапазонам (см. табл. 4.2, в которой также приведены и источники соответствующих излучений). Между диапазонами нет резких переходов, они иногда перекрываются, а границы между ними условны. Поскольку скорость распространения излучения (в вакууме) постоянна, то частота его колебаний жестко связана с длиной волны в вакууме.

Деление по диапазонам частот и длин волн

Название диапазона		Длины волн	Частоты	Источники
Радио- волны	Сверхдлинные	Более 10 км	Менее 30 кГц	Атмосферные явления. Переменные токи в проводниках и электронных потоках (колебательные контуры)
	Длинные	10–1 км	30–300 кГц	
	Средние	1 км – 100 м	300 кГц – 3 МГц	
	Короткие	100–10 м	3–30 МГц	
	Ультракороткие	10 м – 1 мм	30 МГц – 300 ГГц	
Инфракрасное излучение		1 мм – 780 нм	300 ГГц – 429 ТГц	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических взаимодействиях
Видимое (оптическое) излучение		780–380 нм	429–750 ТГц	
Ультрафиолетовые лучи		380–10 нм	$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$ Гц	Излучение атомов под воздействием ускоренных электронов
Рентгеновские лучи		$10-5 \cdot 10^{-3}$ нм	$3 \cdot 10^{16} - 6 \cdot 10^{19}$ Гц	Атомные процессы при воздействии ускоренных заряженных частиц
Гамма-лучи		Менее $5 \cdot 10^{-3}$ нм	Более $6 \cdot 10^{19}$ Гц	Ядерные и космические процессы, радиоактивный распад

Для демонстрации условности диапазонов ниже дана несколько иная, более детальная, табл. 4.3 длин волн, частот и энергий фотонов для электромагнитного излучения в разных диапазонах; шкала электромагнитных волн представлена на рис. 4.7. Связь частоты с длиной волны: $\lambda = c/\nu$. Квантовая связь энергии фотона с его частотой: $E = 2\pi\hbar\nu$, или $E = \hbar\omega$, где ω – круговая частота фотона: $\omega = 2\pi\nu$; \hbar – постоянная Планка, $\hbar = 6,58 \cdot 10^{-16}$ эВ · с.

Длины волн, частоты и энергии фотонов

Длина	Наименование	Частота	Энергия
Более 100 км	Низкочастотные электрические колебания	0–3 кГц	0–12 пэВ
100 км – 1 мм	Радиоволны	3 кГц – 300 ГГц	12 пэВ – 1,2 мэВ
100–10 км	Мириаметровые (очень низкие частоты)	3–30 кГц	12–120 пэВ
10–1 км	Километровые (низкие частоты)	30–300 кГц	0,12–1,2 нэВ
1 км – 100 м	Гектометровые (средние частоты)	300 кГц – 3 МГц	1,2–12 нэВ
100–10 м	Декаметровые (высокие частоты)	3–30 МГц	12–120 нэВ
10–1 м	Метровые (очень высокие частоты)	30–300 МГц	120–1 200 нэВ
1 м – 10 см	Дециметровые (ультравысокие)	300 МГц – 3 ГГц	1,2–12 мкэВ
10–1 см	Сантиметровые (сверхвысокие)	3–30 ГГц	12–120 мкэВ
1 см – 1 мм	Миллиметровые (крайне высокие)	30–300 ГГц	0,12–1,2 мэВ
1–0,1 мм	Децимиллиметровые (гипервысокие)	300 ГГц – 3 ТГц	1,2–12 мэВ
2 мм – 760 нм	Инфракрасное излучение	150 ГГц – 400 ТГц	0,6 мэВ – 1,7 эВ
760–380 нм	Видимое излучение (оптический спектр)	400–800 ТГц	1,7–3,4 эВ
380–3 нм	Ультрафиолетовое излучение	800 ТГц – 100 ПГц	3,4–400 эВ
10 нм – 10 пм	Рентгеновское излучение	30 ПГц – 30 ЭГц	120 эВ – 120 кэВ
≤ 10 пм	Гамма-излучение	≥ 30 ЭГц	≥ 120 кэВ

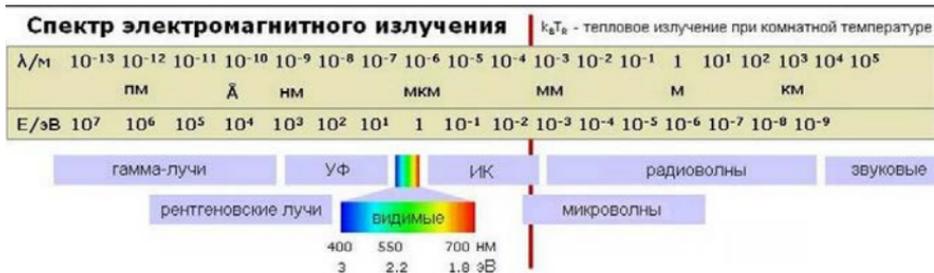


Рис. 4.7. Шкала электромагнитных волн

Выше использованы десятичные кратные (дека- (10^1); гекто- (10^2); кило- (10^3); мега- (10^6); гига- (10^9); тера- (10^{12}); пета- (10^{15}); экса- (10^{18}); зетта- (10^{21}); йотта- (10^{24})) и дольные (деци- (10^{-1}); санти- (10^{-2}); милли- (10^{-3}); микро- (10^{-6}); нано- (10^{-9}); пико- (10^{-12}); фемто- (10^{-15}); атто- (10^{-18}); зепто- (10^{-21}); йокто- (10^{-24})) приставки, применяемые в системах единиц.

Все спектральные линии, волновые числа которых вычисляются по формуле Бальмера, образуют спектральную **серию Бальмера**. Наибольшее число спектральных линий серии Бальмера (37 линий) было обнаружено в спектре солнечной хромосферы и протуберанцев (облаках раскаленных газов, образующихся на Солнце и выбрасываемых из него). Постоянная Ридберга R_H была с большой точностью измерена на линиях серии Бальмера. Она оказалась равной **109 677,581 см^{-1}** .

Удивительное совпадение результатов измерений длин волн линий спектра водорода в видимой области спектра с вычислениями по формуле Бальмера побудило исследователей изучить спектр водорода в других областях. Эти поиски увенчались успехом. Кроме серии Бальмера в спектре атома водорода были обнаружены другие серии, причем все они описывались спектральными формулами, аналогичными формуле Бальмера.

Так, в далекой ультрафиолетовой части спектра – в области длин волн $\sim 1\,200\text{ Å}$ и менее – Лайман открыл серию линий, называемую теперь **серией Лаймана**:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 2, 3, 4, 5 \dots$$

В инфракрасной части спектра обнаружилось три серии спектральных линий:

- в области длин волн от 10 000 до 20 000 Å – **серия Пашена**;
- в области длин волн, близких к 40 000 Å – **серия Брэггетта**;
- наконец, в очень далекой инфракрасной области, вблизи 75 000 Å, – **серия Пфунда**.

Все спектральные линии, обнаруженные у атома водорода в разных частях спектра, можно охватить одной общей формулой, формулой Бальмера – Ридберга

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

В этой формуле для каждой серии линий число m имеет постоянное значение от 1 до 5: $m = 1, 2, 3, 4, 5$, а внутри данной серии число n принимает ряд возрастающих численных значений, начиная от $m + 1$.

Формула Бальмера показывает, что с увеличением числа n волновые числа (частоты) возрастают, но с каждым шагом все на меньшую величину, то есть спектральные линии сближаются, волновые числа, например для серии Бальмера, приближаются к величине $R_H/4$, а длины волн уменьшаются, приближаясь к величине k . Таким образом, согласно этой формуле в данной серии спектральных линий водорода должны отсутствовать линии с длинами волн λ , меньшими 364,56 нм (отвечающим $n = \infty$).

Забегая вперед, заметим, что колебания электронов вблизи их положений равновесия в модели атома Томсона не могли объяснить такого поведения спектров. Частоты линий излучения совсем не являются простыми кратными низшей частоты, как должно быть в случае периодических колебаний заряда, и это также стало серьезным возражением против модели Томсона.

Таким образом, модель атома должна была правильно описывать и рассеяние альфа-частиц, и поведение спектров атомов (в первую очередь простейшего атома – атома водорода).

Результаты опытов по рассеянию альфа-частиц (из которых следовало, что практически вся масса атома и положительный заряд сконцентрированы в очень малом объеме, по сравнению с объемом самого атома) привели Резерфорда к модели атома, напоминающей построение Солнечной системы и получившей название планетарной (рис. 4.8). Она имеет следующий вид. В центре атома находится положительно заряженное ядро, размеры которого (10^{-12} см) очень малы, по сравнению с размерами атома (10^{-8} см), а масса почти равна массе атома. Вокруг ядра движутся электроны, подобно планетам вокруг Солнца; число электронов в незаряженном (нейтральном) атоме таково, что их суммарный отрицательный заряд компенсирует (нейтрализует) положительный заряд ядра.

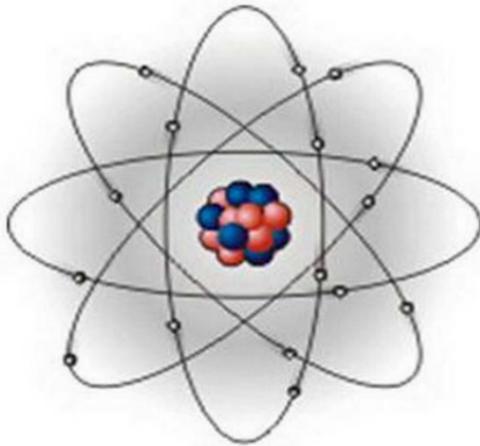


Рис. 4.8. Планетарная модель атома

4.3. Модели атома в «дорезерфордовскую» эпоху

4.3.1. Атом Босковича

Из тех немногих, кто в XVIII в. верил в атомы, Боскович – единственный, кто не верил в атомы – твердые шарики. Поэтому его воззрения ближе к нам, чем все атомные теории XIX в.



Руджер Иосип Бошкович (Боскович) (*Rudjer Josip Boskovich*; 1711–1787) – физик, математик и астроном, иностранный почетный член Петербургской академии наук (1760).

Родился в Рагузе (теперь Дубровник, Хорватия) в семье торговца, учился в иезуитском коллегииуме в Риме, особенно усердно занимался астрономией, математикой и физикой. Уже к началу 40-х гг. он выдвинулся как один из сильнейших математиков. Работал в Италии и Франции. В основном труде «Теория натуральной философии...» (1758) развил качественную теорию строения вещества и высказал гипотезу о зависимости характера (притяжения или отталкивания) сил взаимодействия частиц от расстояния между ними.

Вот выдержки из Энциклопедического словаря Брокгауза и Ефрона, изданного в Петербурге в 1890–1907 гг.: «**Боскович Рожер Иосиф** – математик и астроном, род. в Рагузе 18 мая 1711, поступил в орден иезуитов и в 1740 г. сделан учителем математики и философии в Collegium Romanum. В Риме он был привлечен вместе

с Вовителли и Полени к совету над изысканием способа реставрировки купола церкви Св. Петра, Папа же поручил ему измерить меридиан, проходящий через Папскую область, что и было им исполнено в 1750–53 г. С 1760 г. Б. путешествовал, посетил Англию, Францию, Турцию, Польшу, Германию и, вернувшись в 1764 г. в Италию, получил место профессора в Павии, но вскоре уехал в Париж. Спустя некоторое время Б. начал преподавание в Милане и построил астрономическую обсерваторию при Бреровском коллегииуме, отчасти на свои собственные средства. После упразднения ордена иезуитов в 1773 г. Б. уехал в Париж и получил здесь от короля ежегодную пенсию в 8 000 ливров и звание директора оптического дела при флоте. Вследствие, однако ж, нерасположения к нему д'Аламбера и других французских ученых Б. оставил Париж, отправился в Бассано, где занялся изданием своих произведений, затем вернулся в Милан, впал здесь в меланхолию и умер в сумасшествии 12 февраля 1787 г. В палатце Брера поставлен ему памятник. Из его многочисленных трудов более замечательны: “De maculis solaribus” (1736), “De expeditione ad dimetendos secundi meridiani gradus” (Рим, 1755). Часть своего путешествия по Европе Б. описал в “Journal d’un voyage de Constantinople en Pologne” (Пар., 1772). Б. был также поэтом и оставил дидактическое стихотворение “De solis ac lunae defectibus” (Лондон, 1764).

Учение Босковича. Так как современное представление естествоиспытателей о веществе содержит в себе нечто совершенно иное, чем то, что имели в виду древние метафизики, то полезно в виде примера привести существенные черты учения **Босковича**, которого ныне повсюду считают в некотором смысле основателем современных представлений о В. [Подробности должно искать в издании Югославянской академии (“Rad Jugoslavenske Akademije znanosti i umjetnosti”, kniga LXXXVII, LXXXVIII, XC, в Загребе, 1887–1888), один том которого целиком посвящен изложению жизни и учений **Босковича**, имя которого вместе с **Коперником** составляет справедливую гордость западных славян, потому что оба эти ученых патера стоят впереди своего времени и дали многое науке.] Оно изложено им в 1758–1764 гг. в “Philosophiae naturalis theoria reducta ad unicum legem virium in natura existentium»...”.

Свое недоверие к несжимаемым атомам-шарикам Боскович обосновывал тем, что с помощью таких атомов нельзя объяснить кристаллическую структуру тел и их упругость, плавление твердых веществ, испарение жидкостей, а тем более химические реакции между веществами, построенными из таких круглых, твердых и непроницаемых шаров. Боскович представлял себе атом как центр сил, которые меняются в зависимости от расстояния до этого центра. Ближе к центру – силы отталкивающие, что соответствует отталкиванию атомов при тесном сближении или при их столкновении. При удалении от центра отталкивающая сила сначала уменьшается, затем обращается в нуль и, наконец, становится притягивающей – как раз в этот момент, говорил Боскович, образуются все жидкие и твердые тела. Но если мы еще удалимся от центра сил, то силы вновь станут отталкивающими – в этот момент жидкие тела испаряются. И совсем далеко от атома силы всегда притягивающие, как того и требует закон всемирного тяготения Ньютона.

Таким образом, каждый атом Босковича «простирается вплоть до границ Солнечной системы», а поскольку центры сил нельзя ни уничтожить, ни создать, то его атомы вечны, так же как и атомы Демокрита. Атом Босковича значительно ближе к современному атому, чем атом Демокрита. Например, как и современный атом, он не имеет определенных геометрических размеров. Зато с его помощью можно понять разнообразие форм кристаллов и всевозможные химические превращения, в которых эти атомы участвуют... Конечно, атом Босковича – это умозрительная схема, которая не опирается ни на опыт, ни на математику, а лишь на здравый смысл и внимательные наблюдения над природой. Рисунок 4.9 из книги Босковича изображает закон изменения сил, как он его себе представлял, удивительным образом по форме напоминает закон изменения сил, действующих между двумя атомами водорода (в правом верхнем углу рисунка). (Для более детального знакомства см. книгу Л. Пономарева «По ту сторону кванта». М.: Молодая гвардия, 1971.)

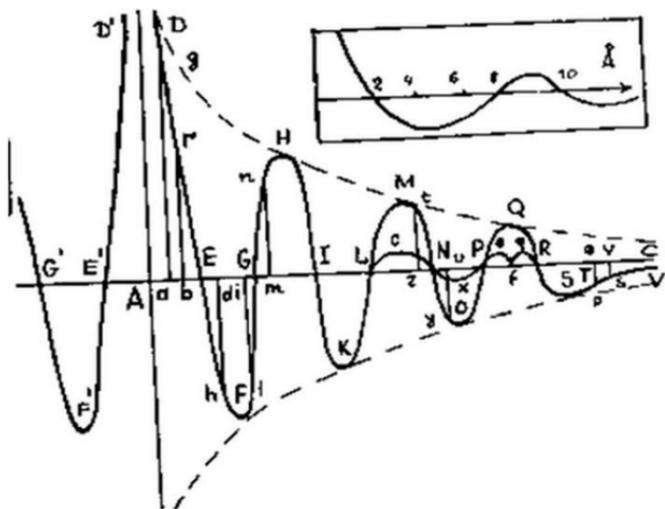


Рис. 4.9. Схема закона изменения сил в представлении Босковича

В конце XIX в., с открытием электрона, стало понятно, что он каким-то образом входит в состав атома. Появились новые модели, уже опирающиеся на экспериментальные данные, в которых электрон стал одним из главных составляющих атома, и на хорошо разработанные к тому времени классические электродинамику и механику. Однако все они столкнулись с непреодолимыми трудностями. Выход нашелся только в квантовой теории.

Остановимся на некоторых из этих моделей. Строение атома занимало в конце XIX – начале XX в. умы всех образованных людей, и физики

придумывали хитроумные способы и эксперименты, чтобы понять настоящее устройство атома (подробнее см.: Льюис Марио «История физики». М.: Мир, 1970), и, в конечном счете, им это удалось.

4.3.2. Атом Дж. Дж. Томсона – Кельвина

Проблему связи электронов со строением вещества Дж. Дж. Томсон стал обдумывать уже в своей работе по определению удельного заряда электронов (1897). Он считал, что за модель атома можно принять модель Босковича или просто систему некоторого числа взаимно отталкивающихся электронов, сдерживаемых вместе некоторой центральной силой. Его первая простейшая модель базировалась на опытах профессора Альфреда Майера (Технологический институт Стивенса в Хобокене, штат Нью-Джерси, США) с плавающими магнитами (1878). Суть их заключалась в следующем. В сосуде с водой плавали пробки, в которые были вставлены едва выглядывающие из них намагниченные иглы. Полярность видневшихся направленных вверх концов игл была на всех пробках одной и той же. Над этими пробками на высоте около 60 см располагался противоположный полюс цилиндрического магнита, и иглы притягивались к магниту, одновременно отталкиваясь друг от друга. В итоге эти пробки самопроизвольно образовывали различные равновесные геометрические конфигурации. Если пробка было 3 или 4, то они располагались в вершинах правильного многоугольника. Если их было 6, то 5 пробок плавали в вершинах правильного многоугольника, а шестая оказывалась в центре. Если магнитов 29, то один помещается в центре фигуры, а остальные располагались вокруг нее кольцами: в ближнем к центру кольце плавали 6, в следующих кольцах по мере удаления от центра соответственно 10 и 12. Эту механическую конструкцию Дж. Дж. Томсон перенес на строение атома, видя в ней возможность объяснения закономерностей, заложенных в Периодической системе элементов Менделеева (имеется в виду сплошное распределение электронов в атоме).

Однако вопрос о конкретном числе электронов в атоме и о том, что их там удерживает, оставался неясным. И если предположить, что электронов, например, несколько сотен или тысяч (особенно с учетом того что масса электрона мала по сравнению с массой иона водорода), то изучение поведения электронов в такой конструкции практически невозможно. Поэтому в 1899 г. Дж. Дж. Томсон видоизменил свою модель, предположив, что нейтральный атом содержит большое число электронов, отрицательный заряд которых компенсируется «чем-то, что делает пространство, в котором рассеяны электроны, способным действовать так, как если бы оно имело положительный электрический заряд, равный сумме отрицательных зарядов электронов». И это уже большой шаг вперед, потому что в этой модели атом состоит не только из электронов, но из электронов и чего-то еще, точно не

определенного, но которое служит центром образования атома. Электроны расположены в положениях равновесия, то есть могут колебаться вблизи этих положений.

В 1902 г. в журнале *Phil. Mag.* (No. 2) появилась работа **Уильяма Томсона**, известного как **лорд Кельвин** (1824–1907), в которой также рассматривалось взаимодействие электрона с атомом.

По Кельвину, внешний электрон притягивается к атому с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния от центра электрона до центра атома (по закону Кулона); электрон же, входящий в состав атома, притягивается к последнему с силой, прямо пропорциональной расстоянию от центра электрона до центра атома (то есть как внутри равномерно заряженного шара).

Таким образом, в атоме имеется равномерное сферическое распределение положительного электрического заряда и определенное количество электронов. Если речь идет об одноэлектронном атоме, то электрон находится в центре атома (в центре положительного заряда, и это – положение устойчивого равновесия). Если же в атоме находятся два или больше электронов, то встает вопрос об устойчивости такого атома. Кельвин высказал допущение, что, по-видимому, электроны вращаются вокруг центра атома, будучи расположенными на сферических поверхностях, концентрических границе атома, и эти поверхности также находятся внутри атома.

Детальным исследованием этих вопросов и занялся Дж. Дж. Томсон, оставаясь в течение примерно пятнадцати лет сторонником идей Кельвина. Поэтому эту модель атома правильнее называть **моделью Дж. Дж. Томсона – Кельвина** (рис. 4.10.).

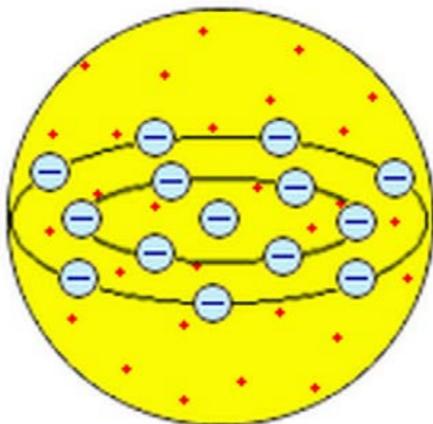


Рис. 4.10. Атом по Дж. Дж. Томсону – Кельвину

В 1903 г. Дж. Дж. Томсон установил, что вращающиеся электроны должны порождать эллиптически поляризованные световые волны. В 1904 г. он рассмотрел проблему механической устойчивости атомной структуры. Кроме того, он установил, что если число электронов в атоме больше восьми, то электроны должны располагаться несколькими кольцами, и число электронов в каждом кольце должно расти с ростом радиуса кольца.

Дж. Дж. Томсон считал каждую такую конфигурацию определяющей химические свойства атомов. Предположив, что число электронов в атоме непрерывно возрастает с ростом массового числа при переходе от элемента к элементу, он впервые попытался связать строение атомов с периодичностью свойств элементов и теоретически объяснить Периодическую систему элементов Менделеева.

Эту попытку Нильс Бор позднее назвал «знаменитой» и указал, что со времени этой попытки «идея о разделении электронов в атоме на группы сделалась исходным пунктом и более новых воззрений». Отметив, что теория Дж. Дж. Томсона оказалась несовместимой с опытными фактами, Бор, тем не менее, считал, что эта теория «содержит много оригинальных мыслей и оказала большое влияние на развитие атомной теории»

Нужно отметить, что Дж. Дж. Томсон искал возможность экспериментального исследования строения атома для проверки своей модели. И он предложил способ определения числа электронов в атоме, основанный на рассеянии рентгеновских лучей, предполагая, что именно электроны должны являться рассеивающими центрами. Проведенные эксперименты показали, что количество электронов в атомах элементов связано с атомной массой и равно приблизительно половине этой атомной массы.

Ныне общепризнанной является появившаяся в 1910 г. планетарная (ядерная) модель Резерфорда, в 1913 г. усовершенствованная Н. Бором. Тем не менее модель Томсона ценна тем, что стимулировала постановку ряда задач, требующих экспериментального решения и постановку решающих экспериментов, которые, в результате, коренным образом изменили представления о нашем мире. Это следующие проблемы:

- 1) **связь числа электронов с массой атома;**
- 2) **природа и распределение в атоме положительного заряда, компенсирующего отрицательный заряд электронов;**
- 3) **распределение массы атома.**

Эти проблемы были решены в процессе последующего развития физики XX в., и их решение в итоге привело к современным представлениям о строении атома.

4.3.3. Модель атома как планетной системы

Такая мысль о подобии атома планетной системе приходила в голову многим: о ней писал Л. Пуанкаре, о ней говорили и В. Вин, и Ж. Перрен, который в своей нобелевской лекции причислял себя к пионерам планетарной модели атома.

Подобную же модель предложил в 1904 г. японский физик **Хантаро Нагаока** (1865–1950) в сообщении, сделанном им в декабре 1903 г. в Токийском физико-математическом обществе; в следующем году это сообщение было опубликовано в английском журнале *Nature*. В модели Нагаоки атом уподоблялся планете Сатурн; роль планеты выполнял положительно заряженный шар, представляющий собой основную часть объема атома, а электроны располагались подобно спутникам Сатурна, образуя его кольца (рис. 4.11).

«Система, – разъясняет ученый, – состоит из большого числа частиц одинаковой массы, расположенных по кругу через равные угловые интервалы и взаимно отталкивающихся с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними; в центре круга помещается большая частица, которая притягивает другие частицы, образующие кольцо, по тому же закону». Он также отметил, что при движении частиц вокруг центра система остается устойчивой по отношению к малым поперечным или продольным колебаниям.

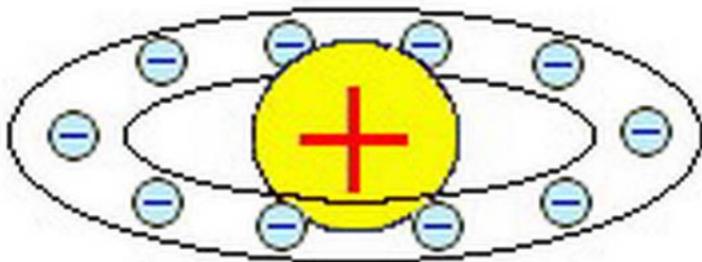


Рис. 4.11. Атом по Нагаоки

Спрашивается: почему же эти модели не нашли дальнейшего развития? Ответ на этот вопрос понятен с точки зрения классической физики, и он был высказан Вильгельмом Вином (1864–1928) в 1905 г. на съезде немецких естествоиспытателей и врачей.

4.3.4. Противоречия и трудности планетарных моделей

Итак, в 1905 г. В. Вин выступал с докладом об электронах на съезде немецких естествоиспытателей и врачей в Мюнхене. Здесь он, в частности, указывал на трудность объяснения линейчатых спектров атомов с точки зрения электронной теории. Он говорил: **«Проще всего было бы понимать каждый атом как планетную систему, которая состоит из положительно заряженного центра, вокруг которого обращаются электроны как планеты. Но такая система не может быть устойчивой** вследствие излучаемой электронами энергии. Поэтому мы вынуждены обратиться к системе, в которой электроны находятся в относительном покое или обладают ничтожными скоростями, хотя такое представление содержит много сомнительного». Такой статической моделью был атом Дж. Дж. Томсона – Кельвина. И эта модель была в то время общепринятой по причинам, указанным Вином.

Планетарная (или ядерная) модель атома Резерфорда натолкнулась точно на такие же трудности, несмотря на твердые экспериментальные доказательства того, что положительный заряд и масса атома сконцентрированы в ничтожно малом объеме внутри атома. Согласно классической электродинамике заряженная частица, движущаяся с ускорением, непрерывно излучает электромагнитную энергию. Поэтому электроны, двигаясь вокруг ядра, то есть ускоренно, должны были бы непрерывно терять энергию на излучение. В этом случае они почти мгновенно потеряли бы всю свою кинетическую энергию и за какую-то долю секунды упали бы на ядро. Атом же, напротив того, является весьма стабильной системой.

Другая трудность состояла в следующем. В соответствии с классической электродинамикой частота излучаемого электроном света должна быть равна или кратна частоте колебаний электрона в атоме (то есть числу оборотов электрона по своей орбите в одну секунду). В этом случае излучаемый свет по мере приближения электрона к ядру должен непрерывно изменять свою частоту, и спектр излучаемого им света должен быть сплошным. Но это также противоречит опыту.

Таким образом, в рамках модели атома Резерфорда не могли быть объяснены устойчивость атома по отношению к излучению и линейчатые спектры его излучения. На ее основе не могли быть объяснены и законы теплового излучения, и законы фотоэлектрических явлений, которые возникают при взаимодействии излучения с веществом.

Тем не менее модель Резерфорда получила ряд неопровержимых экспериментальных доказательств в ее пользу и послужила основой для создания принципиально новой теории, которую разработал в 1913 г. датский физик Нильс Хенрик Давид Бор. Все противоречия модели Резерфорда оказалось возможным разрешить, лишь отказавшись от ряда привычных представлений классической физики.

4.4. Экспериментальные свидетельства в пользу модели Резерфорда

Решающим, или, как назвал его английский химик Фредерик Содди, «драматическим», годом для модели Резерфорда был 1913 г. Четыре основных факта, установленных почти одновременно, помогли убедить научную общественность в достоверности ядерной (планетарной) модели атома:

1) экспериментальное «правило смещения», сформулированное Содди весной 1913 г.;

2) понятие «атомного номера», выдвинутое незадолго до этого ван ден Бруком;

3) «квантование электронных орбит», сформулированное Бором летом того же года;

4) «закон Мозли», установленный зимой того же года опытным путем.

Фредерик Содди сформулировал закон радиоактивного смещения, который утверждает, что при излучении альфа-частиц происходит превращение одного элемента в изотоп другого элемента, расположенного на два места ниже в периодической таблице, а бета-излучение вызывает смещение на одно место выше. Правило смещения дало возможность предсказывать последовательность распада многих радиоактивных элементов, определяя образующиеся таким образом элементы на основе того или иного вида излучения и включая их в периодическую таблицу. В 1921 г. Содди была присуждена Нобелевская премия по химии «за вклад в химию радиоактивных веществ и за проведенное им исследование природы и происхождения изотопов».



Фредерик Содди (*Frederick Soddy*; 1877–1956) – английский радиохимик, член Лондонского королевского общества (1910), лауреат Нобелевской премии по химии (1921).

Совместно с Резерфордом предложил теорию радиоактивного распада, послужившую началом развития современного учения об атоме и атомной энергии. В 1903 г. Резерфорд и Содди установили закон радиоактивного распада. Рамзай и Содди спектроскопическим путем обнаружили образование гелия из радона. Попытки размещения многочисленных радиоактивных продуктов превращения урана и тория в Периодической системе элементов Менделеева оказались плодотворными после введения Содди понятия об изотопах; в 1913 г. Содди и К. Фаянс независимо друг от друга сформулировали правило смещения, позво-

ляющее предсказать место в Периодической системе элемента – продукта радиоактивного распада. Содди экспериментально доказал (1915), что радий образуется из урана.

Антониус ван ден Брук заметил, что данные по рассеянию альфа-частиц лучше объясняются моделью Резерфорда, если предположить **ядерный заряд равным порядковому номеру элемента** в Периодической системе элементов Менделеева, названному им атомным номером. Отношение атомного номера к атомному весу приблизительно равно 0,5 для легких атомов и постепенно уменьшается, достигая примерно 0,4 для урана, последнего элемента системы. Таким образом, идея ван ден Брука, не удаляясь сильно от ранее найденного экспериментального закона, обладала соблазнительной простотой. Она получила твердое экспериментальное обоснование с открытием закона Мозли.

Антониус ван ден Брук (*Antonius van den Broek*; 1870–1926) – нидерландский юрист и физик.

В 1889–1895 гг. изучал юриспруденцию в Лейденском и Парижском университетах; в 1895 г. получил диплом доктора права Лейденского университета. До 1903 г. занимался юридической практикой, после чего его интересы переместились в область естественных наук. Член Нидерландской академии наук (1923). В 1907 г. в немецком журнале *Annalen der Physik* вышла первая статья ван ден Брука по физике – «Альфа-частица и периодическая система элементов».

В 1911 г., спустя месяц после создания Э. Резерфордом ядерной модели атома, ван ден Брук выдвинул гипотезу, согласно которой порядковый номер элемента в периодической таблице равен числу электронов в атоме и, следовательно, положительному заряду ядра атома (*Nature*, 20 июня 1911). В 1913 г. предложил протонно-электронную модель строения атомных ядер. Согласно этой модели ядро состоит из протонов и особых, ядерных, электронов (последние испускаются ядрами радиоактивных элементов в качестве бета-лучей). Протонно-электронная гипотеза являлась общепризнанной до 1932 г. Только после открытия Дж. Чедвиком нейтрона появилась модель ядра, состоящего из протонов и нейтронов.

Генри Мозли (1887–1915), безвременно погибший во время Первой мировой войны, начал работать в Манчестере в качестве добровольного ассистента Резерфорда, проводя свои исследования спектров рентгеновских лучей. К тому времени английский физик Чарлз Гловер Баркла (1877–1944)



уже показал, что достаточно жесткие рентгеновские лучи, попадая на простое вещество, порождают *характеристические* рентгеновские лучи, которые имеют одну и ту же частоту, характерную для данного элемента и не зависящую от частоты первичных рентгеновских лучей (за это открытие Баркла получил Нобелевскую премию по физике за 1917 г.). Мозли измерил **частоты основных спектральных линий**, открытых Баркла для ряда элементов периодической системы, и нашел, что они **пропорциональны квадрату числа**, которое изменяется на единицу при переходе от одного элемента периодической системы к соседнему. Этот опытный факт (не предполагавший никаких теоретических представлений ни о строении атома, ни о происхождении его излучения) приобрел глубокий смысл, как только Мозли показал, что «атому присуща некая характерная величина, которая регулярно увеличивается при переходе от атома к атому. **Эта величина – не что иное, как заряд внутреннего ядра**».



Генри Гвин Джефрис Мозли (*Henry Gwyn Jeffreys Moseley*; 1887–1915) – английский физик, один из основоположников рентгеновской спектроскопии. Кроме открытия закона, носящего его имя, еще измерил длины волн рентгеновских лучей. Изучил спектры элементов от алюминия до золота, установил (1914) порядковые номера всех элементов и доказал, что в промежутке между водородом и ураном предостоят открыть элементы № 43, 61, 72, 75, 85, 87, 91. Выполнил ряд исследований радиоактивности.

Закон Мозли явился неопровержимым доказательством правильности размещения элементов в Периодической системе элементов Менделеева и сыграл важную роль в установлении физического смысла периодической системы и атомного номера. Атомный номер, совпадающий, по гипотезе ван ден Брука, с величиной положительного заряда ядра атома, стал основой классификации химических элементов.

Идею ван ден Брука (кроме опытных данных Мозли) подтверждало также правило Содди. Поскольку каждое испускание альфа-частицы уменьшает массу атома на 4 и атомный номер на 2, тогда как потеря бета-частицы увеличивает заряд на 1 и оставляет неизменной массу атома, то достаточно узнать тип излучения данного радиоактивного семейства и атомный номер его родоначальника, чтобы непосредственно определить атомный номер и массу всех элементов данного семейства и сопоставить их с данными опыта. Сопоставление давало результаты, полностью соответствующие теории.

Группа Резерфорда искала способ непосредственного определения величины заряда ядра, но Первая мировая война приостановила работы. И только в 1920 г. Джеймс Чедвик произвел первое точное измерение заряда ядра некоторых элементов, определив его по доле альфа-частиц, отклоняющихся на определенный угол при столкновении с атомами исследуемого элемента. Этим методом он нашел заряды ядер для меди, серебра и платины, оказавшиеся соответственно равными 29,3; 46,3 и 77,4, а их атомные номера – 29, 47 и 78. Соответствие для того времени вполне удовлетворительное.

4.5. Модель атома Бора – Резерфорда

Напомним, что в рамках модели атома Резерфорда (и вообще классической физики) не могли быть объяснены:

- 1) устойчивость атома по отношению к излучению;
- 2) линейчатые спектры его излучения;
- 3) законы теплового излучения;
- 4) законы фотоэффекта.

Модель Бора опиралась на **квантовую гипотезу**, которую выдвинул еще в 1900 г. немецкий физик **Макс Планк**. Планк постулировал, что вещество может испускать энергию излучения только конечными порциями, пропорциональными частоте этого излучения. Применив квантовую гипотезу для объяснения фотоэффекта, **Альберт Эйнштейн** в 1905 г. предложил фотонную теорию света.

4.5.1. Квантовая гипотеза Макса Планка

Макс Карл Эрнст Людвиг Планк (*Max Karl Ernst Ludwig Planck*; 1858–1947) – выдающийся немецкий физик. Основатель квантовой теории, предопределил основное направление развития физики с начала XX в.

Для объяснения закона распределения энергии в спектре теплового излучения – излучения нагретых тел – Планк предположил, что атомы вещества испускают электромагнитную энергию (свет) в виде отдельных порций – квантов света, энергия которых E пропорциональна ν (частоте излучения):

$$E = h \nu,$$



где h – постоянная, характерная для квантовой теории и получившая название постоянной Планка. Сейчас чаще используется \hbar – h перечеркнутая ($h = 2\pi\hbar$), которая связывает энергию с круговой частотой кванта $\omega = 2\pi\nu$:

$$E = \hbar\omega.$$

4.5.2. Квантовое объяснение фотоэффекта Альберта Эйнштейна

В 1905 г. А. Эйнштейн дал квантовое объяснение фотоэффекта, открытого в 1886–1887 гг. Генрихом Герцем. Суть его объяснения такова. При падении света на металл кванты выбивают электроны (фотоэлектроны) из металла, причем часть энергии кванта $h\nu$ идет на совершение работы $A_{\text{вых}}$ выхода электрона из металла (преодоление энергии связи электрона, она определяет **красную границу спектра** фотонов, при которой начинается фотоэффект), другая часть – на сообщение ему кинетической энергии $T_{\text{кин}}$, то есть

$$h\nu = A_{\text{вых}} + T_{\text{кин}}.$$

При этом Эйнштейн ввел понятие о квантах света как особого рода **частицах**; эти частицы впоследствии получили название **фотонов**.

Заметим, что **корпускулярной теории света** придерживался еще **Ньютон**, однако в 1802 г. **Томас Юнг** (1773–1829), исходя из наблюдения интерференции, дал убедительные доказательства в пользу **волновой природы света**, и с тех пор никто в этом не сомневался. Более того, в 1860–1865 гг. **Джеймсом Клерком Максвеллом** (1831–1879) была построена теория электромагнетизма, из которой следовало существование электромагнитных волн. Тот же Герц в 1885–1889 гг. экспериментально подтвердил их существование. Он исследовал отражение, интерференцию, дифракцию и поляризацию электромагнитных волн, доказал, что скорость их распространения совпадает со скоростью распространения света и что свет представляет собой не что иное, как разновидность электромагнитных волн (подтвердив гипотезу, высказанную Максвеллом). Результаты, полученные Герцем, легли в основу развития беспроводной телеграфии и радио.

И вот в 1905 г. **Эйнштейн** опять заявил, что **свет в определенных ситуациях** – это частицы. Забегая вперед, отметим, что **Луи де Бройль** в 1924 г., исходя из того, что волна (свет) может вести себя как частица, предположил, что, следовательно, и **частица может вести себя как волна**. Эта гипотеза в дальнейшем объяснила весь круг квантовых явлений, в том числе и постулаты Бора, и явилась основой современной квантовой теории.

Альберт Эйнштейн (*Albert Einstein*; 1879–1955) – один из основателей современной теоретической физики, лауреат Нобелевской премии по физике 1921 г., общественный деятель-гуманист.

Жил в Германии (1879–1893, 1914–1933), Швейцарии (1893–1914) и США (1933–1955). Почетный доктор около 20 ведущих университетов мира, член многих академий наук, в том числе иностранный почетный член Академии наук СССР (1926).

Автор более 300 научных работ по физике, а также около 150 книг и статей в области истории и философии науки, публицистики и др.

Разработал несколько значительных физических теорий.

Специальная теория относительности (1905). В ее рамках – закон взаимосвязи массы и энергии: $E = mc^2$.

Общая теория относительности (1907–1916).

Квантовая теория фотоэффекта и теплоемкости.

Квантовая статистика Бозе – Эйнштейна.

Статистическая теория броуновского движения.

Теория индуцированного излучения.

Теория рассеяния света на термодинамических флуктуациях в среде.

Предсказал *гиромагнитный эффект Эйнштейна – де Гааза*. С 1933 г. работал над проблемами космологии и единой теории поля.

Эйнштейну принадлежит решающая роль в пересмотре понимания *физической сущности пространства и времени* и построении новой теории гравитации взамен ньютоновской.

Эйнштейн также, вместе с Планком, заложил основы квантовой теории.

Эти концепции, многократно подтвержденные экспериментами, образуют фундамент современной физики.

Нобелевская премия за 1921 г. была присуждена Эйнштейну «за теорию фотоэффекта... и другие работы в области теоретической физики». 10 ноября 1922 г. секретарь Шведской королевской академии наук Кристофер Ауривиллиус писал Эйнштейну: «Как я уже сообщил Вам телеграммой, Королевская академия наук на своем вчерашнем заседании приняла решение присудить Вам премию по физике за прошедший (1921) год, отмечая тем самым Ваши работы по теоретической физике, в частности открытие закона фотоэлектрического эффекта, не учитывая при этом Ваши работы по теории относительности и теории гравитации, которые будут оценены после их подтверждения в будущем».

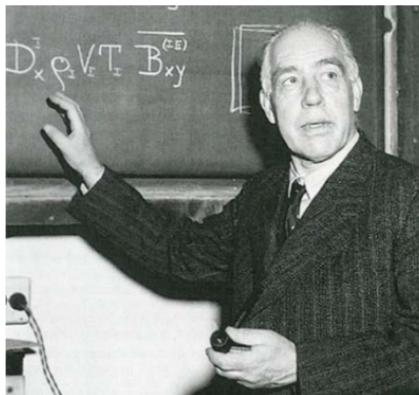
Активно выступал против войны, против применения ядерного оружия, за гуманизм, уважение прав человека, взаимопонимание между народами.

Итак, модель Бора опиралась на **квантовую гипотезу Планка и фотонную теорию** света Эйнштейна. Бор объяснил устойчивость планетарной



модели атома и одновременно спектральные данные с позиций квантовой теории, сформулировав ряд постулатов, накладывающих на модель атома квантовые ограничения.

4.5.3. Постулаты Бора



Нильс Хенрик Давид Бор (*Niels Henrik David Bohr*; 1885–1962) – датский физик-теоретик и общественный деятель. Лауреат Нобелевской премии по физике 1922 г. Член Датского королевского общества (1917) и его президент с 1939 г. Был членом более 20 академий наук мира, в том числе иностранным почетным членом Академии наук СССР (1929).

Один из основоположников современных представлений о субатомном мире, активный участник разработки основ квантовой механики, создатель первой квантовой теории атома. Внес значительный вклад в развитие теории атомного ядра и ядерных реакций, процессов взаимодействия элементарных частиц со средой.

Итак, в 1913 г. Нильс Бор объяснил устойчивость планетарной модели атома (и одновременно спектральные данные), сформулировав ряд постулатов, накладывающих на модель атома квантовые ограничения.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний) гласит: атомная система может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n . В стационарных состояниях атом не излучает энергию.

Этот постулат находится в явном противоречии с классической механикой, согласно которой энергия движущегося электрона может быть любой. Он находится в противоречии и с электродинамикой, так как допускает возможность ускоренного движения электронов без излучения электромагнитных волн. Согласно первому постулату Бора атом характеризуется системой энергетических уровней, каждый из которых соответствует определенному стационарному состоянию. Состояние с наименьшей энергией E_1 называется основным состоянием атома.

Второй постулат Бора (правило частот) формулируется следующим образом: при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_m в другое стационарное состояние с энергией E_n излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n,$$

где h – постоянная Планка. Отсюда можно выразить частоту излучения:

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}.$$

Второй постулат Бора также противоречит электродинамике Максвелла, так как частота излучения определяется только изменением энергии атома и никак не зависит от характера движения электрона.

4.5.4. Правило квантования Бора

Вспомним формулу Бальмера – Ридберга, переписав ее в виде

$$\nu_{mn} = cR_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Нетрудно заметить, что эта формула имеет структуру, в точности совпадающую с формулой Бора, и полностью будет ей тождественна, если энергии стационарных уровней даются формулой

$$E_n = cR_H \frac{h}{n^2}.$$

Как заметил Бор, чтобы получить такое выражение для энергий стационарных уровней атома водорода, достаточно предположить, что выполняется следующее соотношение между скоростью движения электрона и радиусом орбиты:

$$m_e \nu r_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3...).$$

Здесь m_e – масса электрона; ν – его скорость; r_n – радиус стационарной круговой орбиты.

Правило квантования Бора позволяет вычислить радиусы стационарных орбит электрона в атоме водорода и определить значения энергий. Величина $L = m_e \nu r_n$ для круговых орбит есть так называемый момент количества движения, или момент импульса электрона. Эта величина, как энергия и импульс, является сохраняющейся величиной, в общем случае момент импульса равен произведению импульса на его плечо, аналогично тому как момент силы есть произведение силы на ее плечо. Чтобы увеличить или уменьшить момент импульса системы, к ней нужно приложить момент силы – это аналог закона Ньютона для вращательного движения.

Таким образом, правило квантования Бора формулируется очень просто: момент количества движения L может принимать только дискретные значения, кратные постоянной Планка \hbar , то есть

$$L = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3\dots).$$

4.5.5. Радиусы электронных орбит в атоме водорода

Движение электрона, вращающегося по круговой орбите некоторого радиуса r в кулоновском поле ядра, как следует из второго закона Ньютона, определяется равенством центростремительной силы силе Кулона

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}.$$

Переписав это выражение для n -й боровской орбиты и используя квантованные значения момента импульса, получим:

$$\frac{m_e^2 v^2 r_n^2}{m_e} = e^2 r_n = \frac{L_n^2}{m_e} = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e}.$$

Отсюда следует выражение для квантованных радиусов боровских орбит ($n = 1, 2, 3\dots$) электрона, в стационарных состояниях:

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{e^2 m_e} \equiv \frac{n^2 \hbar c}{e^2} \cdot \frac{\hbar}{m_e c} = \frac{n^2}{\alpha} \lambda_{ce}.$$

Здесь $\alpha = e^2/\hbar c$ – так называемая постоянная тонкой структуры, это фундаментальная безразмерная константа, приблизительно равная $1/137$, она является характеристикой электромагнитных взаимодействий. Также появилась знакомая комптоновская длина волны электрона. Видно, что радиус первой боровской орбиты электрона в 137 раз больше его комптоновской длины волны: $r_1 \approx 137 \cdot 3,86 \cdot 10^{-11} \approx 0,53 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 0,53 \text{ \AA}$. Целое число n называется главным квантовым числом.

Зная радиусы электронных орбит, теперь можно вычислить энергии атома в стационарных состояниях.

4.5.6. Уровни энергий атома водорода

Равенство центростремительной силы к силе Кулона можно переписать так:

$$\frac{m_e v^2}{2} = \frac{e^2}{2r},$$

то есть при движении в кулоновском поле кинетическая энергия T электрона всегда равна по величине половине его потенциальной энергии, $U/2$ (это частный случай так называемой теоремы вириала для движения в конкретном – кулоновском – поле).

Поскольку потенциальная энергия электрона в атоме отрицательна ($U = -e^2/r$), то $T = -U/2$, соответственно полная энергия электрона в атоме $E = T + U = U/2 = -e^2/2r$. Подставляя сюда квантованные радиусы боровских орбит, получим:

$$E_n = -\frac{e^2}{2r_n} = -\frac{e^4 m_e}{2\hbar^2 n^2} \equiv -\frac{1}{n^2} \frac{e^4}{\hbar^2 c^2} \frac{m_e c^2}{2} = -\frac{1}{n^2} \frac{\alpha^2 m_e c^2}{2}.$$

Энергетические уровни электронов в атоме и переходы между ними схематически изображены на рис. 4.12–4.14.

Заметим, что энергия основного состояния ($n = 1$) атома водорода в $2/\alpha^2$ раз меньше энергии покоя электрона, $E_1 \approx 0,511 \cdot 10^6/2 \cdot 137^2 = 13,6$ эВ. Эта величина называется ридбергом (Ry): $E_1 = 1 \text{ Ry} = 13,6$ эВ.

Из выражения для энергий прямо следует формула Бальмера – Ридберга:

$$\nu_{mn} = \frac{E_n - E_m}{h} = \frac{\alpha^2 m_e c^2}{2h} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = cR_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

откуда для величины постоянной Ридберга получаем:

$$R_H = \frac{\alpha^2 m_e c^2}{2hc} = \frac{E_1}{hc} = \frac{E_1}{2\pi\hbar c} = 109\,700 \text{ см}^{-1}.$$

Здесь использовано табличное значение постоянной $\hbar c = 1,973 \cdot 10^{-5}$ эВ · см $\approx 2 \cdot 10^{-5}$ эВ · см. Экспериментальное значение для R_H равно $109\,677,581 \text{ см}^{-1}$.

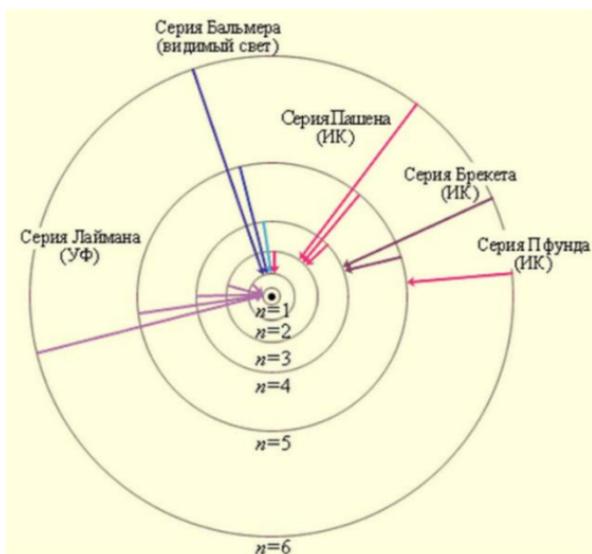


Рис. 4.12. Стационарные орбиты атома водорода и образование спектральных серий

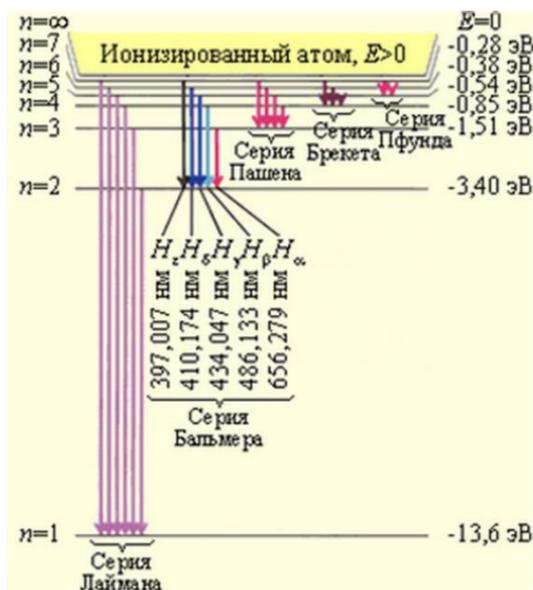


Рис. 4.13. Схема энергетических уровней атома водорода. Показаны переходы, соответствующие различным спектральным сериям. Для первых пяти линий серии Бальмера в видимой части спектра указаны длины волн

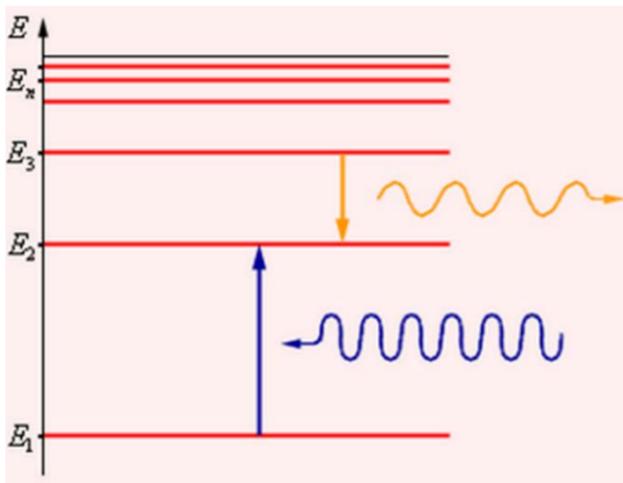


Рис. 4.14. Схема энергетических уровней атома водорода. Стрелками показаны переходы, соответствующие: 1) поглощению кванта (синий цвет) $h\nu_1$, при этом атом из основного состояния E_1 переходит в возбужденное $E_2 = E_1 + h\nu_1$; 2) излучению кванта (желтый цвет) $h\nu_2$, при этом атом переходит с верхнего уровня E_3 на более низкий уровень $E_2 = E_3 - h\nu_2$

Прекрасное согласие боровской теории атома водорода с экспериментом служило веским аргументом в пользу ее справедливости.

Однако попытки применить эту теорию к более сложным атомам не увенчались успехом. Бор не смог дать физическую интерпретацию правилу квантования.

Ответ дала квантовая механика и, в первую очередь, гипотеза де Бройля о том, что частицы могут проявлять волновые свойства.

4.6. Волны де Бройля

Как мы уже отметили, Бор не смог дать физическую интерпретацию правила квантования. Это было сделано десятилетием позже Луи де Бройлем на основе представлений о волновых свойствах частиц. Де Бройль предположил, что у любой частицы, как и у фотона, могут проявляться волновые свойства, причем длина волны частицы, как и для фотона, определяется ее импульсом $p = m\nu$:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\nu} = \frac{2\pi\hbar}{m\nu}.$$

Действительно, из формулы Эйнштейна для соотношения между энергией и импульсом частицы $E_2 = p^2c^2 + m^2c^4$ для фотона получим $p = E/c$, поскольку его масса равна нулю (по Эйнштейну, только безмассовые частицы распространяются со скоростью света); используя связь частоты и энергии фотона $E = h\nu$, получим связь импульса p и длины волны λ , то есть $p = h\nu/c = h/\lambda$.

Эту связь де Бройль распространил на все частицы, и это обобщение оказалось блестящей догадкой, которая привела к созданию современной квантовой теории.

Правила квантования Бора сразу следуют из гипотезы де Бройля, если предположить, что каждая орбита в атоме водорода соответствует волне, распространяющейся по окружности вокруг ядра атома. Стационарная орбита возникает только в том случае, когда волна непрерывно повторяет себя после каждого оборота вокруг ядра. В противном случае после первого оборота максимум пришедшей волны не совпадет с максимумом предыдущей, и через несколько оборотов волна придет уже в противофазе к первоначальной волне и ее уничтожит (так называемая деструктивная интерференция). Стационарная волна возможна, только когда на длине орбитальной окружности укладывается целое количество длин волн. А это и есть правило квантования Бора:

$$2\pi r_n = n\lambda_n = \frac{2\pi n\hbar}{mv_n},$$

или $mv_n r_n = n\hbar$.

Другими словами, стационарная орбита соответствует круговой стоячей волне де Бройля на длине орбиты (рис. 4.15). Это явление очень похоже на стационарную картину стоячих волн в струне с закрепленными концами.

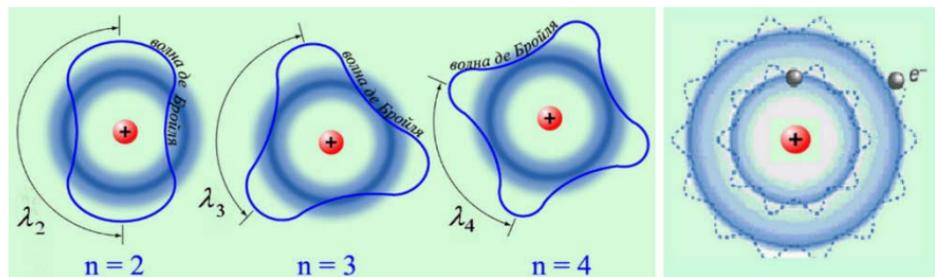


Рис. 4.15. Иллюстрация возникновения стоячих волн на стационарных орбитах

С ростом квантового числа n радиус орбиты возрастает и увеличивается число пространственных периодов, укладывающихся на орбите, при

этом расстояния между уровнями уменьшаются и, в конце концов, спектр превращается в непрерывный, как в классической физике. Наибольшая дискретность, то есть квантовые эффекты, проявляется тогда, когда размеры системы сравнимы с длиной волны. Когда эти размеры велики по сравнению с длиной волны, начинает работать классическая физика. Переход к классическому пределу осуществляется, если устремить постоянную Планка (и, тем самым, все длины волн) к нулю.

Луи Виктор Пьер Раймон де Бройль, 7-й герцог Броли (фр. *Louis-Victor-Pierre-Raymond, 7ème duc de Broglie*; 1892–1987) – французский физик, пожизненный секретарь Французской академии наук, нобелевский лауреат по физике 1929 г..

Один из создателей квантовой механики, всемирно известный ученый, чьи работы в области теоретической физики, а также выдающийся литературный талант глубоко изменили современную физику и поставили его в один ряд с самыми выдающимися учеными нашего времени.

Де Бройль родился в Дьеппе в 1892 г. в одной из самых аристократических семей. Он окончил лицей в Париже и в 1909 г. получил степень бакалавра истории в Парижском университете.

Однако, проявив склонность к точным наукам, отказался от карьеры историка и палеонтолога и в 1913 г. получил в том же университете степень бакалавра точных наук. После службы в армии в годы Первой мировой войны работал в лаборатории, созданной его братом Морисом де Бройлем. Здесь он занимался экспериментальными спектроскопическими исследованиями, где проблема выбора трактовок (между корпускулярной и волновой) оптических явлений стояла особенно остро.

В 1924 г. де Бройль представил свою работу «Исследования по квантовой теории» в качестве докторской диссертации факультету естественных наук Парижского университета. Его оппоненты и члены ученого совета были настроены весьма скептически. Они рассматривали идеи де Бройля как теоретические измышления, лишённые экспериментальной основы. Однако по настоянию Эйнштейна докторская степень ему все же была присуждена. В следующем году де Бройль опубликовал свою работу в виде обширной статьи. На Эйнштейна она произвела большое впечатление, и он советовал многим физикам тщательно изучить ее. Эрвин Шредингер последовал совету Эйнштейна и положил идеи де Бройля в основу волновой механики, обобщившей квантовую теорию.

В 1927 г. волновое поведение материи получило экспериментальное подтверждение. В исследованиях Клинтона Дж. Дэвиссона и Лестера Х. Джермера, работавших с низкоэнергетическими электронами в США, Джорджа П. Томсона в Англии и Петра Саввича Тартаковского в СССР, использовавших электроны большой энергии, была обнаружена дифракция электронов. Открытие связанных с электронами волн, которые можно отклонять в нужную сторону и фокусировать, привело в 1933 г.



к созданию Эрнстом Руской электронного микроскопа. Волны, связанные с материальными частицами, теперь принято называть волнами де Бройля.

В 1929 г. де Бройль был удостоен Нобелевской премии по физике «за открытие волновой природы электронов». Представляя лауреата на церемонии награждения, член Шведской королевской академии наук Карл Вильгельм Озеен заметил: «Исходя из предположения о том, что свет есть одновременно и волновое движение, и поток корпускул, де Бройль открыл совершенно новый аспект природы материи, о котором ранее никто не подозревал... Блестящая догадка де Бройля разрешила давний спор, установив, что не существует двух миров, один – света и волн, другой – материи и корпускул. Есть только один общий мир».

Согласно сформулированному Н. Бором **принципу соответствия**, квантовая физика включает в себя законы классической физики, и при определенных условиях можно обнаружить плавный переход от квантовых представлений к классическим, как в случае энергетического спектра атома водорода при больших квантовых числах $n \gg 1$, когда дискретные уровни постепенно сближаются и возникает плавный переход в область непрерывного спектра, характерного для классической физики (см. рис. 4.13, 4.14).

4.6.1. Опыт Франка и Герца.

Дискретность энергетических состояний атома

Почти одновременно с созданием теории Бора было получено прямое экспериментальное доказательство существования стационарных состояний атома и квантования энергии. Дискретность энергетических состояний атома была продемонстрирована в опыте Джеймса Франка и Генриха Герца (1913), в котором исследовалось столкновение электронов с атомами ртути. Оказалось, что если энергия электронов меньше 4,9 эВ, то их столкновение с атомами ртути происходит по закону абсолютно упругого удара. Если же энергия электронов равна 4,9 эВ, то столкновение с атомами ртути приобретает характер неупругого удара, то есть в результате столкновения с неподвижными атомами ртути электроны полностью теряют свою кинетическую энергию. Это означает, то атомы ртути поглощают энергию электрона и переходят из основного состояния в первое возбужденное состояние E_2 ,

$$E_2 - E_1 = 4,9 \text{ эВ.}$$

Согласно Бору, при обратном самопроизвольном переходе атома ртути должна испускать кванты с такой же энергией и соответствующей частотой:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ Гц.}$$

Спектральная линия с такой частотой действительно была обнаружена в ультрафиолетовой части спектра в излучении атомов ртути.

При дальнейшем увеличении энергии электронов удары снова становились упругими, пока не достигалась новая критическая энергия. Наблюдаемое явление позволило сделать вывод о том, что атом может или вообще не поглощать энергию, или же поглощать ее в количествах, равных разности энергий стационарных состояний.

4.6.2. Развитие модели Бора и Периодическая система элементов Менделеева

В более сложных, чем водород, атомах оказалось, что максимально возможное число электронов на каждом уровне равно удвоенному квадрату главного квантового числа; это число оказалось равным количеству элементов в периодах периодической таблицы. Модель Бора, таким образом, выявила несомненную связь периодичности свойств элементов со строением электронных оболочек атомов.

Для атома водорода расчеты спектров на основе модели Бора дали хорошее согласие с экспериментом, но для других элементов получалось существенное расхождение с опытными данными.

В 1916 г. немецкий физик **Арнольд Иоганн Вильгельм Зоммерфельд** уточнил модель Бора. Им было высказано предположение, что кроме круговых электрон может двигаться и по эллиптическим орбитам. При этом почти одинаковому уровню энергии соответствует число типов орбит, равное главному квантовому числу. Зоммерфельд дополнил модель другим (орбитальным) квантовым числом (определяющим форму эллипсов) и зависимостью массы электрона от скорости.

Основываясь на модели атома Бора – Зоммерфельда, представляющей собой компромисс между классическими и квантовыми представлениями (в классическую картину вводились квантовые ограничения), Нильс Бор в 1921 г. заложил основы формальной теории периодической системы. Причина периодичности свойств элементов, по мнению Бора, заключалась в периодическом повторении строения внешнего электронного уровня атома.

В 1923 г. немецкий физик **Альфред Ланде** ввел в модель атома магнитное квантовое число, а **в 1925 г.** молодые физики **Джордж Юджин Уленбек и Сэмюэл Абрахам Гаудсмит** ввели в атомную физику представление о спине электрона.

Американский физик **Артур Холли Комптон**, основываясь на атомных спектрах высокого разрешения, еще в 1921 г. высказывал предположение о квантованном вращении электрона, а в следующем году **Отто Штерн и Вальтер Герлах** экспериментально наблюдали разделение пучка атомов серебра в неоднородном магнитном поле на две части, соответствующие ориентации электронных спинов.

В 1925 г. Вольфганг Паули опубликовал свою работу, содержащую формулировку *принципа запрета*, носящего его имя: в данном квантовом состоянии может находиться только один электрон. Паули указал, что для характеристики состояния электрона необходимо четыре квантовых числа: главное квантовое число n , азимутальное квантовое число l и два магнитных числа: m_1 и m_2 .

В 1927 г. немецкий физик Фридрих Хунд сформулировал эмпирические правила заполнения электронных оболочек. С применением принципа Паули и принципа насыщения уровней к 1927 г. была в целом построена электронная структура всех известных к тому времени 92 элементов. Создание учения о строении электронных оболочек атомов позволило прийти к формальной физической теории периодической системы, объяснившей причины периодичности свойств элементов и их соединений, а также создать первые теории химической связи.

4.6.3. Дальнейшее развитие идей де Бройля. Квантовая механика

Исходя из идеи де Бройля о волнах материи австрийский физик Эрвин Шредингер в 1926 г. вывел **основное уравнение квантовой (волновой) механики** – *уравнение Шредингера*, содержащее волновую функцию и позволяющее определить возможные состояния квантовой системы и их изменение во времени. Шредингер дал общее правило преобразования классических уравнений в волновые. В рамках волновой механики атом можно было представить в виде ядра, окруженного стационарной волной материи. Волновая функция определяла плотность вероятности нахождения электрона в данной точке.

Приблизительно в это же время (1925–1927) в работах Макса Борна, Вернера Гейзенберга, Паскуаля Йордана и Вольфганга Паули был разработан иной вариант **квантовой теории** в виде *матричной механики*. Матричная квантовая механика опиралась на сформулированный Бором принцип соответствия, согласно которому при увеличении квантового числа, когда квантовая дискретность стремится к нулю, законы квантовой физики должны переходить в классические законы. Она позволяла объяснить существование стационарных квантованных энергетических состояний и рассчитать энергетические уровни различных систем.

Результаты, к которым приводили методы, используемые в волновом и матричном подходах, оказались одинаковыми. Дальнейшие исследования показали, что эти две формулировки квантовой механики являются эквивалентными.



Макс Борн (*Max Born*; 1882–1970).
Нобелевская премия по физике 1954 г.
«за фундаментальные исследования
в квантовой механике, в особенности
за его статистическую интерпретацию
волновой функции».



Эрвин Шредингер
(*Erwin Schrödinger*; 1887–1961).
Нобелевская премия по физике 1933 г.
«за открытие новых продуктивных
форм атомной теории» (совместно
с Полем Дираком).



Вернер Карл Гейзенберг
(*Werner Karl Heisenberg*; 1901–1976).
Нобелевская премия по физике 1932 г.
«за создание квантовой механики, при-
менение которой привело, помимо про-
чего, к открытию аллотропических форм
водорода».



Вольфганг Паули
(*Wolfgang Pauli*; 1900–1958).
Нобелевская премия по физике 1945 г.
«за открытие принципа запрета, также
называемого принципом Паули».

У Шредингера частица сразу выступала как чисто волновое образование, то есть в частице сосредоточена наибольшая энергия волны. Гейзенберг же сформулировал **принцип неопределенности**, в соответствии с которым нельзя одновременно точно определить координату и импульс частицы; точность определения координаты частицы Δx обратно пропорциональна точности определения ее импульса Δp : $\Delta x \Delta p \geq 2\pi\hbar$. Он как раз и указывает на то, что частицы могут вести себя как волны: они как бы «размазаны» в пространстве, поэтому можно говорить не об их точных координатах, а лишь о вероятности их обнаружения в определенной области пространства. Вскоре после того как Шредингером было написано нерелятивистское волновое уравнение и рядом авторов был предложен его релятивистский вариант (уравнение Клейна – Гордона – Фока) для частиц, не обладающих спином (Оскар Клейн, Вальтер Гордон, Владимир Александрович Фок, Эрвин Шредингер), и после безуспешных попыток описать этим уравнением тонкую структуру спектральных линий водорода, английский физик **Поль Дирак в 1928 г.** предложил волновое уравнение, описывающее релятивистский электрон со спином $\frac{1}{2}$. **Спин и магнитные свойства электрона следовали из уравнения Дирака** без каких бы то ни было дополнительных предположений. Кроме того, **теория Дирака предсказывала существование античастиц**, таких как позитрон и антипротон, – двойников частиц с противоположными по знаку электрическими зарядами. Открытие античастиц, а также процессов аннигиляции и рождения пар явилось блестящим подтверждением теории Дирака.



Поль Адриен Морис Дирак (*Paul Andrien Maurice Dirac*; 1902–1984) – английский физик-теоретик, один из основателей квантовой механики, член Лондонского королевского общества (1930).

Учился в Бристольском, затем Кембриджском университетах (окончил в 1924 г.). С 1932 г. – профессор Кембриджского университета, заведовал кафедрой, которую в свое время возглавлял И. Ньютон. Внес важный вклад в разработку квантовой статистики (статистика Ферми – Дирака, 1925). Построил квантовую теорию релятивистского «магнитного» электрона (1928), которая естественным образом включила спин в число его квантовых характеристик и позволила понять необъясненные ранее эффекты, наблюдаемые в спектрах водородоподобных атомов (например, тонкую структуру спектральных линий). Особенно важным результатом было предсказание существования античастицы электрона с массой, равной его массе, но обладающей положительным зарядом. Нобелевская премия по физике 1933 г. «за открытие новых продуктивных форм атомной теории» (совместно с Э. Шредингером).

Часть 5. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ. ОПЫТЫ ПО ДИФРАКЦИИ

5.1. Экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля

5.1.1. Первооткрыватели дифракции электронов на монокристалле

Клинтон Дэвиссон и **Лестер Джермер**, работая в лабораториях телефонной компании «Белл», первые экспериментально доказали существование дифракции электронов на кристаллах – явления, предсказанного еще в 1924 г. Луи де Бройлем. Решающие эксперименты были проведены в январе 1927 г., когда им удалось зарегистрировать явление дифракции электронов на монокристалле никеля.

Клинтон Джозеф Дэвиссон (*Clinton Joseph Davisson*; 1881–1958) – американский физик, лауреат Нобелевской премии 1937 г. (совместно с Джорджем Томсоном) «за экспериментальное открытие дифракции электронов на кристаллах».

Лестер Халберт Джермер (*Halbert Germer Lester*; 1896–1971) – американский физик. Окончил Корнеллский университет (1917). В 1927 г. совместно с Дэвиссоном открыл явление дифракции электронов на монокристалле никеля.



Клинтон Дэвиссон (слева)
и **Лестер Джермер** (1927)

В качестве источника электронов они использовали раскаленную нить, помещенную в вакуумную камеру. Полученный пучок электронов рассеивался на монокристалле никеля. В результате ими были обнаружены интерференционные максимумы в интенсивности рассеянных электронов. По принципу Гюйгенса каждый атом кристалла является источником вторичных рассеянных

волн, они взаимно усиливаются при рассеянии под определенными углами, когда фазы интерферирующих волн совпадают. Дэвиссон и Джермер нашли угол, при котором число рассеянных электронов максимально. Рассчитав по этому углу длину волны и сравнив ее с импульсом электрона, ученые выяснили, что она совпадает с длиной волны, предсказываемой соотношением де Бройля. Так была экспериментально доказана гипотеза о наличии у элементарных частиц волновых свойств.

5.1.2. Масштаб длин волн де Бройля в реальных условиях

Оценим возможные значения длины волн де Бройля в реальных условиях. Пусть электроны разгоняются в вакуумной трубке и проходят некоторую разность потенциалов U , причем ограничимся нерелятивистским случаем. Тогда кинетическая энергия электрона равна $E = eU = mv^2/2 = p^2/2m$, а импульс $p = (2meU)^{1/2}$. Такой электрон обладает длиной волны де Бройля:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2meU}} = 2\pi\tilde{\lambda}_{ce}\sqrt{\frac{mc^2}{2eU}} \equiv \lambda_{ce}\sqrt{\frac{mc^2}{2eU}},$$

где $\lambda_{ce} = 2\pi\tilde{\lambda}_{ce}$ – комptonовская длина волны электрона. Заметим, что величину $\tilde{\lambda}_c$ (см. стр. 114) правильнее было бы называть приведенной комptonовской длиной, но для краткости слово «приведенная» будем опускать.

Если длину волны измерять в ангстремах, а разность потенциалов – в вольтах, то формула принимает вид

$$\lambda = 2\pi \cdot 3,86 \cdot 10^{-3} \text{ \AA} \sqrt{\frac{0,511 \cdot 10^6}{2U}} \approx \frac{12,25}{\sqrt{U}} \text{ \AA}.$$

Итак, если электрон прошел разность потенциалов $U = 10$ В, то длина волны $\lambda = 3,9 \text{ \AA}$. Если $U = 100$ В, то $\lambda = 1,2 \text{ \AA}$, и если $U = 200$ В, то $\lambda = 0,86 \text{ \AA}$. Таким образом, при таких условиях длины волн электронов примерно такие же, как для рентгеновского излучения, и одного порядка с межатомными расстояниями в веществе. Поэтому эксперимент по дифракции таких электронов можно ставить так же, как для рентгеновских лучей, и использовать в качестве дифракционной решетки кристалл.

Значения длины волн де Бройля для любой частицы с массой покоя M_0 и скоростью v можно выразить через λ_c , релятивистскую массу в единицах массы покоя $M/M_0 = \gamma$ и ее скорость в единицах скорости света $v/c = \beta$:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{Mv} = \frac{2\pi\hbar}{M_0c} \frac{1}{\gamma\beta} = \frac{\lambda_c}{\gamma\beta} = \lambda_c \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\beta}.$$

Здесь мы использовали соотношение Эйнштейна

$$E = Mc^2 = \frac{M_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \equiv \gamma M_0 c^2.$$

При малых скоростях $\beta \rightarrow 0$, $\gamma \rightarrow 1$ (в нерелятивистском пределе) имеем:

$$\lambda = \lambda_c / \beta.$$

В этом случае дебройлевская длина волны λ больше комптоновской λ_c . Соответственно при больших скоростях (в релятивистском случае $\beta \approx 1$, $\gamma \gg 1$) получим, наоборот:

$$\lambda = \lambda_c / \gamma.$$

Дebroйлевская длина волны меньше комптоновской, они совпадают при $\beta^2 = 1/2$.

5.1.3. Дифракция на пространственных структурах. Условие Вульфа – Брэгга

Типичным примером пространственной дифракционной решетки является кристаллическая решетка твердого тела. Пространственные периоды кристаллических решеток значительно меньше длин волн видимого света, а потому для видимого света кристаллические вещества являются оптически однородной средой. Дифракция на кристаллических решетках наблюдается только при падении на них рентгеновского излучения (или другого, например электронов), длина волны которого сравнима с периодами кристаллических решеток.

Для изучения условий дифракции пространственно-периодическое расположение атомов в кристаллической решетке заменяют периодическим расположением параллельных атомных плоскостей. Расстояние между соседними плоскостями d называется межплоскостным расстоянием.

Дифракция на кристаллической решетке при падении на нее волны под скользким углом θ к атомным плоскостям (рис 5.1) возникает в результате интерференции излучения, зеркально отражающегося от разных плоскостей, расположенных на расстоянии d друг от друга. Условием возникновения дифракционных максимумов является формула **Вульфа – Брэгга**, которая получается из условия, чтобы разность хода двух лучей (ломаная CBD на рис. 5.1, состоящая из двух одинаковых отрезков, равных по длине $d \sin\theta$) равнялась целому числу длин волн λ . В этом случае волны,

отраженные от разных плоскостей в данном направлении, сложатся в фазе и усилят друг друга:

$$2d \sin \theta = n\lambda.$$

Угол θ называется углом дифракции, или углом Брэгга. Угол между направлениями падающего и отраженного пучков (рис. 5.1) называется углом рассеяния, он равен удвоенному углу Брэгга 2θ .

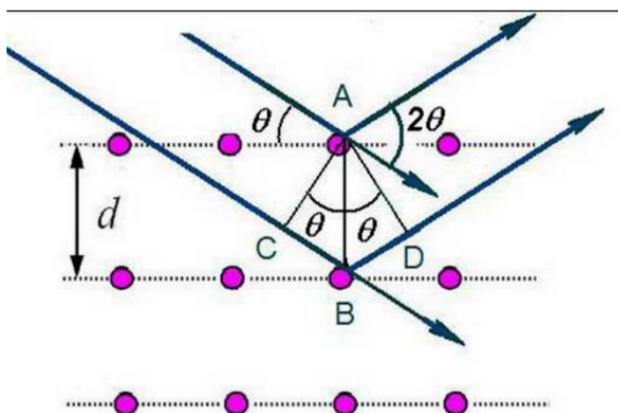


Рис. 5.1. Иллюстрация возникновения дифракционного максимума при отражении от системы кристаллографических плоскостей

Дифракция рентгеновского излучения на кристаллической решетке является основой рентгеноструктурного анализа – одного из самых мощных методов исследования атомно-кристаллического строения вещества.

5.1.4. Дифракция электронов на монокристалле. Опыт Дэвиссона и Джермера

Как мы уже упоминали, исторически первое экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля было получено в 1927 г. американскими физиками К. Дэвиссоном и Л. Джермером. Они обнаружили, что пучок электронов, рассеивающийся на монокристалле никеля, дает отчетливую дифракционную картину, подобную той, которая возникает при рассеянии на кристалле коротковолнового рентгеновского излучения. По положению дифракционных максимумов была определена длина волны электронного пучка, которая оказалась почти в соответствии с вычисленной по формуле де Бройля (см. ниже).

Примерная схема эксперимента изображена на рис. 5.2. Параллельный пучок электронов одинаковой скорости направлялся на монокристалл

никеля, а рассеянные электроны фиксировались коллектором (цилиндр Фарадея) под разными углами α (рис. 5.2, 5.3).

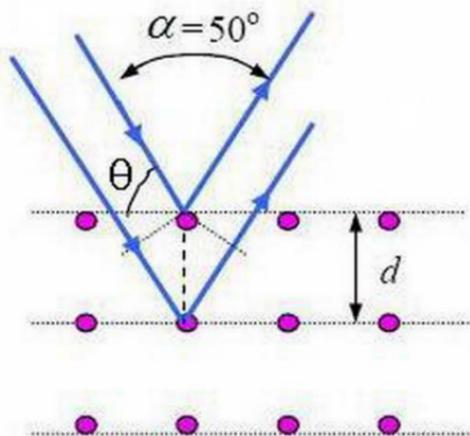


Рис. 5.2. Схема дифракции в опыте Дэвиссона и Джермера

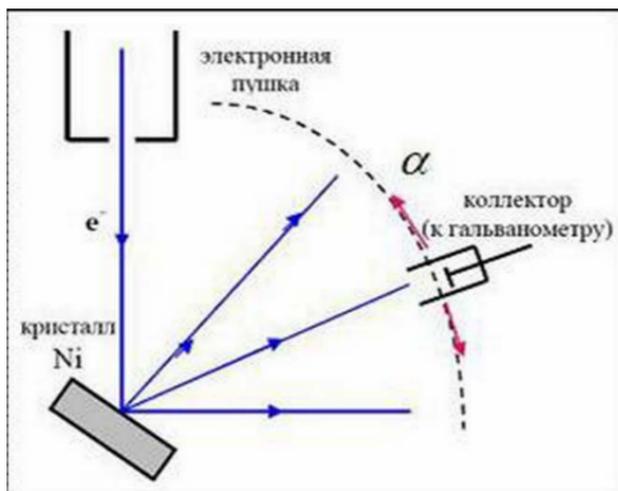


Рис. 5.3. Схема опыта Дэвиссона и Джермера

При разных ускоряющих потенциалах U были получены угловые зависимости – полярные диаграммы (рис. 5.4): сила тока в гальванометре пропорциональна отрезку прямой, соединяющей начало координат и точку на

диаграмме. Наблюдалось различное распределение числа рассеянных электронов в зависимости от угла α . При этом при определенном угле появлялся максимум в угловом распределении. Величина этого угла менялась с изменением ускоряющего потенциала, то есть длины волны де Бройля.

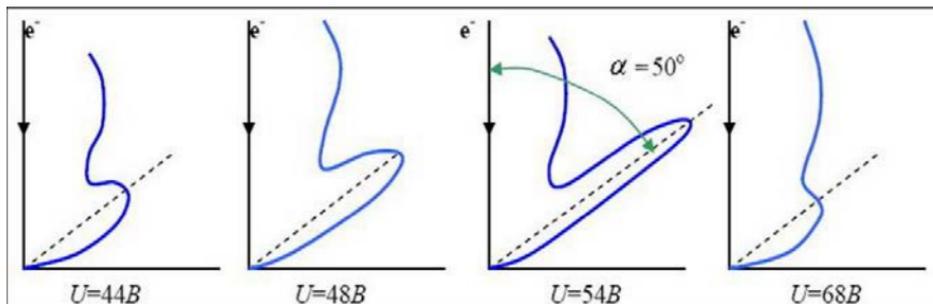


Рис. 5.4. Распределение числа рассеянных электронов в зависимости от угла α

Максимум отражения электронов наблюдался под углом 50° (наиболее сильно при $U = 54 \text{ В}$). Условие появления этого максимума определяется формулой Вульфа – Брэгга

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Выражая длину волны де Бройля через ускоряющее напряжение, получим:

$$\sqrt{U} = n \frac{12,25}{2d \sin \theta}.$$

Из этого соотношения видно, что дифракцию электронов на монокристалле можно наблюдать двумя способами.

Способ 1: ускоряющую разность потенциалов U , то есть и длину волны λ , держать постоянными, а менять угол θ (или α), поворачивая кристалл или детектор электронов (см. рис. 5.4).

Способ 2: держать постоянным угол θ , а менять разность потенциалов U или, что одно и то же, длину волны де Бройля λ . Во втором случае полученные кривые имеют несколько максимумов, которые соответствуют различным значениям n в формуле Вульфа – Брэгга (рис. 5.5).

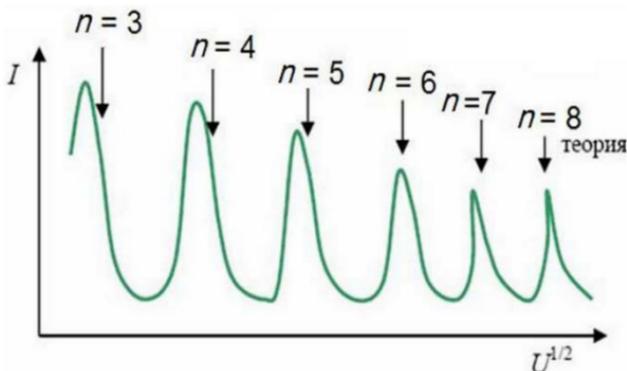


Рис. 5.5. Распределение числа рассеянных электронов в зависимости от длины волны

Если на этом же рис. 5.5 отложить вычисленные по формуле значения числа n (показаны стрелками), то получают систематические отклонения расчетных значений n и экспериментальных положений максимумов для малых n .

Теория, в отличие от эксперимента, дает равноотстоящие максимумы. Причина этого расхождения была объяснена и затем устранена немецким физиком **Гансом Бете**.

Ганс Альбрехт Бете (*Hans Albrecht Bethe*; 1906–2005) – классик физики и астрономии, оставивший след во многих отраслях. Он прожил почти век и никогда не изменял науке. Его последняя оригинальная работа датирована 2002 г., тогда ему было 95! А в 2003 г. была опубликована его статья с воспоминаниями об астрофизике.

Ганс Бете родился 2 июля 1906 г. в Страсбурге, в Германии (теперь этот город расположен во Франции). Учился в университетах Франкфурта и Мюнхена, где в 1927 г. получил докторскую степень под руководством Зоммерфельда.

Внес существенный вклад в **теории распространения электронов в кристаллах, отрицательных ионов водорода и прохождения заряженных частиц через вещество**. Написал знаменитые обзорные работы по **одно- и двухэлектронным атомам и электронам в металлах**.

В 1933 г. эмигрировал из Германии в Англию, где стал заниматься ядерной физикой. Вместе с Рудольфом Пайерлсом разработал **теорию дейтрона** вскоре после его открытия.



В 1935 г. Бете переехал в США, где проработал в Корнеллском университете с 1935 по 2005 г.

Три его работы, написанные в конце 30-х гг. (две из них с соавторами), позже стали называть «**Библией Бете**».

В 1938 г. разработал детальную модель ядерных реакций, которые обеспечивают выделение энергии в звездах. **Он рассчитал скорость энерговыделения для предложенного им CNO-цикла ядерных реакций, который происходит в массивных звездах, и** (вместе с Кричфилдом) – для предложенного другими астрофизиками **протон-протонного цикла**, который играет наиболее существенную роль в маломассивных звездах, например в Солнце.

В начале Второй мировой войны Бете самостоятельно разработал **теорию разрушения брони** снарядом и (вместе с Эдвардом Теллером) написал основополагающую книгу по теории ударных волн.

В 1943–1946 гг. Бете возглавлял теоретическую группу в Лос-Аламосе, в ядерном проекте.

После войны работал над теориями ядерной материи и мезонов, а также первым объяснил **лэмбовский сдвиг в атоме водорода**.

В последние 20 лет жизни работал в области **физики нейтрино**, опубликовал серию работ, посвященных **проблеме дефицита солнечных нейтрино**.

Нобелевская премия по физике 1967 г. «**за открытие циклов термоядерных реакций, являющихся источником энергии звезд**». В его честь назван астероид (30828 Бете).

Для согласования с экспериментом электронным волнам внутри вещества необходимо было приписать показатель преломления (как и для световых волн), который слегка меняет их длину волны и направление внутри кристалла. Это связано с тем, что при попадании в металл электрон ускоряется (металл притягивает электроны), причем только в направлении, перпендикулярном поверхности кристалла, его кинетическая энергия увеличивается приблизительно на работу выхода (то есть на величину потенциала ионизации, которая имеет порядок для разных веществ от нескольких до десятка вольт). Касательная же составляющая скорости остается неизменной, поэтому и изменяется направление движения электрона (и его длина волны), и тем больше, чем меньше его скорость (при высоких энергиях, $eU \gg A_{\text{вых}}$, влияние преломления становится несущественным). **После учета преломления в среде для волн де Бройля было получено полное согласие с экспериментом.**

5.2. Дифракция электронов на поликристаллах

5.2.1. Метод Дебая – Шеррера

Джордж Паджет Томсон (сын знаменитого Дж. Дж. Томсона) узнал об исследованиях **Дэвиссона** в сентябре 1926 г., когда оба ученых встретились на конференции в Оксфорде. Вернувшись в свой Абердинский университет в Шотландии, он начал изучать взаимодействие электронов с тонкими твердыми пленками в вакууме.

Джордж Паджет Томсон (*George Paget Thomson*; 1892–1975) – английский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1937 г. Премия присуждена «за экспериментальное открытие дифракции электронов на кристаллах» (совместно с Дэвиссоном).

В то время как знаменитый отец Томсона **Дж. Дж. Томсон** открыл саму частицу электрон и получил за это Нобелевскую премию в 1906 г., Джордж Томсон продемонстрировал, что электрон обладает волновыми свойствами, в частности он может дифрагировать на упорядоченной решетке.

Созданные им аппаратура и методы изучения электронограмм оказали значительное влияние на развитие экспериментальной техники электрографии.



Почти тогда же, в начале 1927 г., **Петр Саввич Тартаковский** (1895–1939) в Ленинградском физико-техническом институте также осуществил эксперимент по дифракции электронов на поликристаллах алюминия, вписав свое имя в летопись становления квантовой механики и «заработав» от советского правительства двухмесячную заграничную командировку в Германию и Францию (1928).

Дж. П. Томсон и П. С. Тартаковский проводили измерения дифракции электронов на поликристаллических мишенях **методом Дебая – Шеррера**. П. Дебай и П. Шеррер разработали эту методику для наблюдения дифракции рентгеновских лучей. В их методе используются поликристаллические пленки (толщиной 10^{-5} – 10^{-6} см) или порошки.



Петр Саввич Тартаковский (1895–1940).

В 1927 г. выдающийся физик-экспериментатор Тартаковский почти одновременно с американскими учеными Дэвиссоном и Джермером начал опыты по обнаружению дифракции электронов.

Американцы наблюдали дифракционную картину при отражении медленных (с энергиями от 40 до 70 эВ) электронов от монокристалла никеля, а Тартаковский – при прохождении более быстрых (с энергией около 1 кэВ) электронов сквозь тонкую алюминиевую фольгу.

Эта работа, выполненная нашим соотечественником независимо от Дж. П. Томсона, зарегистрировавшего явление дифракции при прохождении быстрых электронов (с энергиями вплоть до 60 кэВ) сквозь пленку золота (1927), внесла реальный вклад в экспериментальное обоснование волновых свойств электрона.

В опытах Дж. П. Томсона и П. С. Тартаковского электроны ускорялись потенциалом $U = 1\text{--}60$ кВ (при этом длины волн де Бройля принимали значения $\lambda = 0,3\text{--}0,05$ Å), затем проходили через пленку, рассеивались и попадали на фотопластинку либо на приемник, на котором накапливался заряд (рис. 5.6).

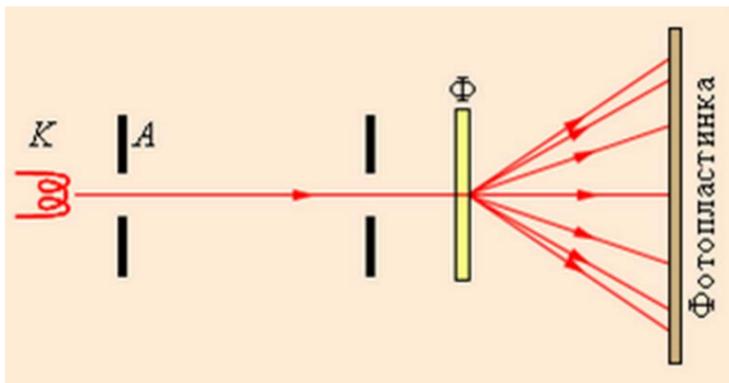


Рис. 5.6. Упрощенная схема опытов Дж. П. Томсона по дифракции электронов. К – накаливаемый катод; А – анод; Ф – фольга из золота, представляющая поликристаллический образец. Электроны ускоряются до заданной энергии в промежутке от катода до анода

Поликристалл – это беспорядочно ориентированные кристаллики. При фиксированной длине волны λ (моноэнергетический электронный пучок) среди множества кристалликов всегда найдутся такие, плоскости которых сориентированы так, чтобы для них выполнялось условие Вульфа – Брэгга: $2d \sin\theta_n = n\lambda$. Тогда под углами $2\theta_n$ (соответствующими разным n) к прямому пучку мы увидим рассеянные электроны, которые на фотопластинке дадут концентрические кольца (рис. 5.7).

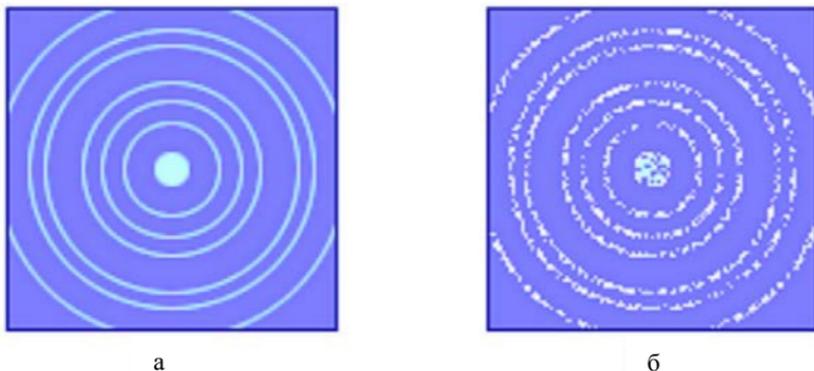


Рис. 5.7. Картина дифракции электронов на поликристаллическом образце при длительной экспозиции (а) и при короткой экспозиции (б). В случае (б) видны точки попадания отдельных электронов на фотопластинку

Если же зафиксируем угол рассеяния, то, изменяя ускоряющее напряжение на электродах, получим увеличение интенсивности рассеянных электронов для энергий, которые определяются условием Вульфа – Брэгга.

5.2.2. Опыты Тартаковского (1927)

П. С. Тартаковский именно так исследовал рассеяние электронов при прохождении через очень тонкую алюминиевую фольгу, помещая за фольгой приемник с кольцевой щелью. Угол рассеяния при этом оставался всегда постоянным ($\theta = 4^\circ 45'$ в формуле Вульфа – Брэгга). Получилось несколько максимумов тока в гальванометре при определенных ускоряющих напряжениях (для различных значений d). Например, для одной из систем плоскостей (с известным d) максимум получился при $U = 1\ 100\ \text{В}$, то есть $\lambda = 0,37\ \text{Å}$, тогда как при данных условиях закон Брэгга дает $\lambda = 0,38\ \text{Å}$, или $U = 1\ 040\ \text{В}$. (Эти результаты опубликованы в «Докладах Академии наук СССР» в 1928 г.) Отсюда П. С. Тартаковский заключает: «Как видим, и этот класс работ приводит к полному подтверждению волновой точки зрения».

5.2.3. Опыты Дж. П. Томсона (1927)

В опытах Дж. П. Томсона использовались ускоряющие напряжения $U = 17,5\text{--}56,5$ кВ. Соответствующие длины волн электронов, проходящих через тонкую металлическую фольгу толщиной $\sim 0,1$ мкм, были равны $\lambda = 0,092\text{--}0,052$ Å. Используемые фольги были изготовлены из алюминия и золота. На установленной за фольгой фотопластинке отчетливо наблюдались концентрические светлые и темные кольца (как на рис. 5.7, радиусы которых изменялись с изменением скорости электронов (то есть длины волны) согласно де Бройлю.

При фиксированной длине волны λ (электронный пучок должен быть монохроматичен) среди множества кристалликов найдутся такие, при отражении от которых выполняется условие Вульфа – Брэгга:

$$2d \sin \theta = n\lambda.$$

Совокупность кристалликов с определенной ориентировкой симметрична относительно направления падающего пучка, вследствие этого на экране наблюдаются кольца (рис. 5.8). Зная диаметр колец D , длину волны и расстояние до экрана L (рис. 5.9), можно найти соответствующие межплоскостные расстояния в кристаллической решетке d .

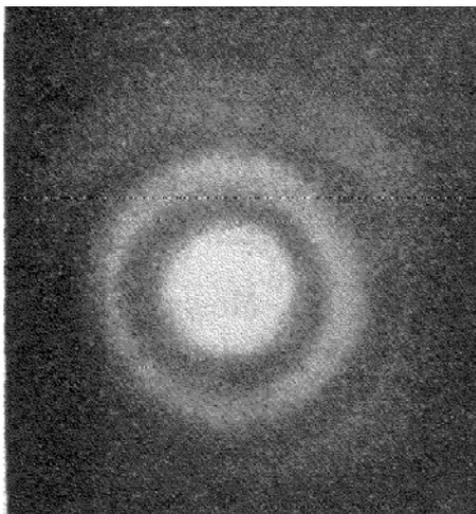


Рис. 5.8. Фотография для золота. Число кругов во всех случаях соответствовало теоретическим ожиданиям

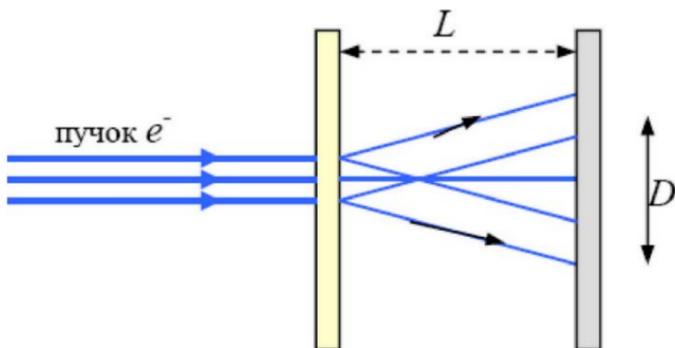


Рис. 5.9. Угол между прямым и отраженными пучками равен $2\theta \approx D/2L$

Поскольку обычно $D \ll L$, то $\sin 2\theta \approx \text{tg} 2\theta \approx 2\theta \approx D/2L$, и условие Вульфа – Брэгга принимает вид

$$d \frac{D}{2L} = n\lambda, \text{ или, используя } \lambda = \frac{12,25}{\sqrt{U}} \text{ \AA}, d = \frac{24,5Ln}{D\sqrt{U}} \text{ \AA}.$$

Наоборот, зная межплоскостные расстояния d , например из дифракции рентгеновских лучей, можно найти длины волн электрона и проверить гипотезу де Бройля. Эксперимент показал ожидаемую дифракционную картину, что независимо подтвердило существование волновых свойств электрона.

5.3. Дифракция нейтронов. Метод Лауэ

Для целей анализа кристаллической и магнитной структуры вещества в настоящее время также используется дифракция нейтронов. Для наблюдения дифракции нейтронов чаще всего используется **метод немецкого физика Макса фон Лауэ** (в этом случае частица проходит через монокристалл, и дифракционная картина наблюдается за кристаллом), хотя дифракция может наблюдаться и **в схеме Брэгга** при отражении от монокристалла, как в опытах Дэвиссона и Джермера, а также при прохождении через поликристалл (**метод Дебая – Шеррера**).

Для регистрации нейтронов используются ядерные реакции, в которых образуются заряженные частицы. Эти частицы регистрируются обычными методами. Например, в газовых гелиевых счетчиках используется изотоп гелия ^3He , поглощающий нейтроны. В результате получается высоковозбужденное состояние изотопа гелия ^4He , которое разваливается на ядро трития (сверхтяжелого водорода) ^3H – тритон и протон ^1H с суммарной энергией 780 кэВ:



Далее заряженные частицы ионизируют газ и вызывают в нем разряд, как в обычном счетчике Гейгера.

В методе Лауэ используется «белый» пучок тепловых нейтронов (то есть нейтроны с непрерывным спектром энергий), который падает на монокристалл. Среди нейтронов с разными энергиями найдутся и такие, для которых выполняется условия Брэгга, они отклонятся на определенный угол соответствующей системой плоскостей кристалла. На экране за монокристаллом (рис. 5.10) проявляются дифракционные максимумы в виде пятен Лауэ: центральное пятно и система симметричных пятен вокруг центрального (так называемая *лауэграмма*, в отличие от *дебаяграммы*).

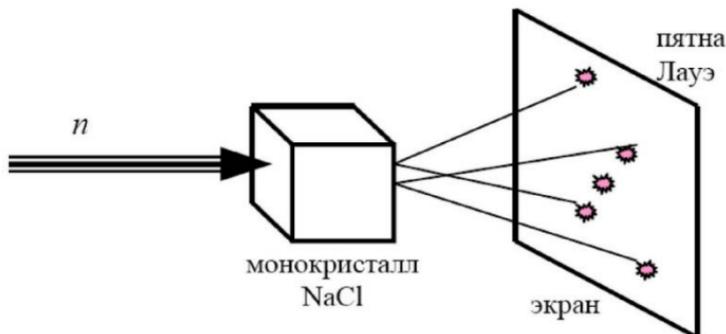


Рис. 5.10. Лауэграмма рассеяния нейтронов с непрерывным спектром на монокристалле

В конечном счете можно сделать вывод, что явление дифракции имеет всеобщий характер, то есть волновые свойства присущи всем материальным объектам.

Первое наблюдение дифракции нейтронов.

Тем не менее первое наблюдение дифракции нейтронов в 1936 г., через четыре года после их открытия, было проведено методом Брэгга по дифракционному отражению нейтронов от системы плоскостей монокристалла окиси магния MgO с межплоскостным расстоянием $d = 2 \text{ \AA}$. На рисунке 5.11 схема эксперимента взята из оригинальной заметки (*Mitchell D.P., Powers P.N. "Bragg Reflection of Slow Neutrons". Phys. Rev. 1936. V. 50. P. 486*).

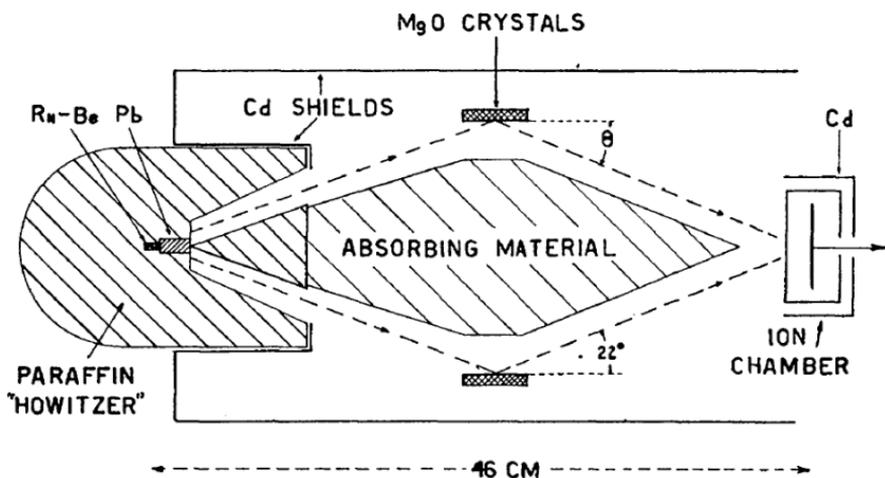


Рис. 5.11. Схема эксперимента по первому наблюдению дифракции нейтрона

5.4. Длины волн макроскопических тел

Возникает вопрос: а что же с макроскопическими телами, могут ли и они проявить волновые свойства? Оказывается, однако, что вследствие большой массы макроскопических тел их волновые свойства не могут быть обнаружены экспериментально. Например, пылинке с массой 10^{-9} г, движущейся со скоростью 0,5 м/с, соответствует волна де Бройля с длиной волны порядка 10^{-21} м, то есть приблизительно на 11 порядков меньше размеров атомов. Такая длина волны лежит за пределами доступной наблюдению области. Более того, размер самой пылинки на много порядков превосходит ее длину волны. Это как раз тот случай, когда осуществляется переход к классическому пределу $\lambda \rightarrow 0$. То есть макроскопические тела могут проявлять только корпускулярные свойства.

5.5. Создатели основ теории дифракции и дифракционных методов исследования вещества



Макс Теодор Феликс фон Лауэ (*Max Theodor Felix von Laue*; 1879–1960) – немецкий физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1914 г. «за открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллах».



Сэр Уильям Лоренс Брэгг (*Sir William Lawrence Bragg*; 1890–1971) – австралийский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1915 г. (совместно со своим отцом Уильямом Генри Брэггом) «за заслуги в исследовании кристаллов с помощью рентгеновских лучей». Сын вывел условие Брэгга (*Bragg W.L.* “The Diffraction of Short Electromagnetic Waves by a Crystal”. *Proc. of the Cambridge Phil. Soc.* 1914. V. 17. P. 43). Отец создал первый рентгеновский спектрометр, на котором они вместе проводили экспериментальные исследования кристаллов.



Георгий (Юрий) Викторович Вульф (1863–1925) – русский, советский кристаллограф, член-корреспондент Академии наук СССР (1921). После открытия Лауэ явления дифракции рентгеновских лучей в кристаллах (1912) Г. В. Вульф и Н. Е. Успенский в 1913 г. создали первую в России рентгеноструктурную лабораторию в Москве, где Вульф пришел к выводу основной формулы рентгеноструктурного анализа. В 1913 г. он сообщил об этом М. Лауэ. В несколько ином виде она была выведена также У. Л. Брэггом, поэтому получила название формулы Брэгга – Вульфа. Принципы определения структуры кристаллов Вульф изложил в работе “Über die Krystallröntgenogramme” (Phys. Z. 1913. Bd 14).



Петер Йозеф Вильгельм Дебай (*Peter Joseph Wilhelm Debye*; 1884–1966) – нидерландско-американский физик, лауреат нобелевской премии по химии 1936 г. «за вклад в науку о структуре молекул благодаря открытию дипольных моментов и дифракции рентгеновских лучей и электронов в газах».



Пауль Шеррер (*Paul Scherrer*; 1890–1970) – швейцарский физик-экспериментатор. Труды по рентгеновским лучам, изучению структуры кристаллов, ядерной физике, физике твердого тела. Разработал (1916, совместно с П. Дебаем) метод рентгеновского структурного анализа мелкокристаллических материалов (метод Дебая – Шеррера).

Часть 6. РАСЩЕПЛЕНИЕ ЯДЕР. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Введение

Итак, как мы говорили, в 1913 г. восторжествовала планетарная (ядерная) модель атома Резерфорда – Бора, одним из краеугольных камней которой было открытие Резерфордом тяжелого и компактного ядра атома в экспериментах по рассеянию альфа-частиц на металлических фольгах. Дальнейшие исследования были приостановлены на несколько лет.

В 1914 г. началась Первая мировая война. Английское правительство назначило Резерфорда членом «гражданского комитета Управления изобретений и исследований британского Адмиралтейства». Эта организация занималась изысканием средств борьбы с подводными лодками противника. Немецкие субмарины наносили большие потери военным и торговым кораблям британского флота. Резерфорд вынужден был заняться исследованиями распространения звука под водой. Результатом стало теоретическое обоснование акустических методов определения местонахождения подводных лодок. Любопытно, что спустя много лет, в годы Второй мировой войны, ученик Резерфорда – Джеймс Чедвик был также привлечен к этой проблеме. Но он разрабатывал не акустические, а электронные методы обнаружения с помощью радаров.

Лаборатория Резерфорда в Манчестерском университете практически распалась, поскольку иностранные ученые покинули Англию, а англичане были призваны в армию. В результате война помешала многим ученикам Резерфорда продолжить многообещающие научные исследования. Генри Мозли, которого Резерфорд считал своим талантливейшим учеником, погиб в 1917 г. в возрасте 28 лет. Джеймс Чедвик содержался в немецком концлагере в качестве военнопленного. Марсден сражался во Франции. Нильс Бор покинул Манчестер и поддерживал лишь почтовую связь с Резерфордом из Копенгагена.

Хотя Резерфорду пришлось много сил отдавать работам военного значения, он продолжал и собственные исследования, проводить которые ему помогал его единственный помощник – ассистент Вильям Кэй, который своей добротой и готовностью помочь снискал общую любовь всех работавших за все эти годы в лаборатории. Резерфорд писал Бору в Данию (9 декабря 1916 г.): «Время от времени мне удается урвать свободные полдня,

чтобы провести некоторые из моих собственных экспериментов, и я думаю, что получил результаты, которые, в конце концов, окажутся чрезвычайно важными. Мне очень хотелось бы обсудить все эти вещи вместе с вами здесь. Я обнаруживаю и подсчитываю легкие атомы, приводимые в движение альфа-частицами, и эти результаты, как мне кажется, проливают яркий свет на характер и распределение сил вблизи ядра. Я также пытаюсь этим же методом взломать атом. В одном из опытов результаты представляются обнадеживающими, но потребуются уйма работы, чтобы их подтвердить. Кэй помогает мне и сейчас уже является большим специалистом по подсчетам».

6.1. «Новая алхимия». Опыты Резерфорда по превращению элементов

В 1919 г. Резерфорд получает результат, положивший начало новой науке – ядерной физике. Если до этого, бомбардируя альфа-частицами атом, он изучал структуру атома и открыл атомное ядро, окончательно разрушив представления о неделимости атома, то теперь ему теми же альфа-частицами удалось разрушить само ядро атома. Он осуществляет первую ядерную реакцию по расщеплению ядра азота альфа-частицей. В результате бомбардировки азота альфа-частицами ядро азота превращается в ядро кислорода, и еще вылетает протон. Не зря в свое время эксперты Нобелевского комитета присудили Резерфорду премию по химии. Рождалась новая научная область, окрещенная современной алхимией, – ядерная химия. Синтез новых элементов и изотопов справедливо считают одним из величайших достижений науки двадцатого столетия. Осуществилась мечта алхимиков всех времен и народов – трансмутация, превращение одних элементов в другие. Однако в роли агента выступил не философский камень, а альфа-частицы.

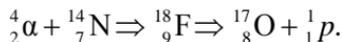
Резерфорд, как говорят, любил сравнивать себя с алхимиками; одна из его книг так и называлась «Новая алхимия», а в его кабинете в Кавендишской лаборатории висела гравюра на дереве, где была изображена лаборатория алхимиков с чучелом крокодила (Крокодил – прозвище Резерфорда) над приборами (в средние века крокодил был символом алхимии).

В 1919 г. Эрнест Резерфорд становится руководителем Кавендишской лаборатории Кембриджского университета, сменив на этом посту своего учителя Джозефа Джона Томсона, который возглавлял ее долгие годы. Резерфорд стал четвертым кавендишским профессором и в этой должности находился 18 последних лет своей жизни. До него Кавендишской лабораторией, основанной в 1874 г., руководили великие английские физики Максвелл, Релей и Томсон.

1919 г. проходит под знаком дальнейшей интенсивной работы Резерфорда по расщеплению ядер. Он получает экспериментальное подтверждение ранее уже установленного им положения: небольшое количество атомов азота при бомбардировке расщепляется, испуская быстрые протоны – ядра

водорода. В свете позднейших исследований, писал Резерфорд, «общий механизм этого превращения вполне ясен. Время от времени альфа-частицы действительно проникают в ядро азота, образуя на одно мгновение новое ядро типа ядра фтора с массой 18 и зарядом 9. Это ядро, которое в природе не существует, чрезвычайно неустойчиво и сразу же распадается, выбрасывая протон и превращаясь в устойчивое ядро кислорода с массой 17...».

Итак, азот – тот самый элемент, у которого в результате бомбардировки альфа-частицами происходит расщепление ядра, и он превращается в водород и кислород. Резерфорд в своем сообщении приводит запись этого процесса, напоминающую химическое уравнение:



Осуществлена первая ядерная реакция, столь важная для продвижения человека к овладению ядерной энергией. Правда, Резерфорд открывает ядерные реакции только в легких элементах. Освободить же ядерную энергию удалось лишь позднее путем расщепления тяжелых ядер, в частности урана. Но для этого впереди еще были новые открытия в физике.

Резерфорд подсчитал, что превращения ядер азота происходят крайне редко – одна альфа-частица из 50 тысяч оказывается достаточно близко к ядру азота, чтобы быть захваченной. Сотрудник Резерфорда – Патрик Блэкетт сфотографировал следы нескольких сотен тысяч альфа-частиц в наполненной азотом камере Вильсона. Он зарегистрировал всего несколько случаев превращений ядер азота.

6.2. Ядерные реакции

В результате длительных экспериментов Резерфорду удалось вызвать ядерные реакции в 17 легких элементах. В их числе были бор, фтор, натрий, алюминий, литий, фосфор. Он также пытался путем бомбардировки альфа-частицами вызвать ядерные реакции в некоторых тяжелых элементах, расположенных в конце периодической таблицы. Однако это ему не удалось. С увеличением атомного номера элемента количество ядерных превращений уменьшалось. У элементов тяжелее аргона с атомным номером 18 совсем уже не наблюдались превращения (не обнаруживались протоны, свидетельствующие о расщеплении).

Продолжая опыты по расщеплению ядер, Резерфорд пришел к следующему выводу: хотя альфа-частицы и обладают большой энергией, но для проникновения в ядра элементов они все же являются недостаточно мощными снарядами. Энергии альфа-частиц от альфа-распада не хватает, чтобы преодолеть кулоновское отталкивание ядер с большими зарядами. Он решил повысить энергию частиц, разгоняя их в высоковольтной установке. Так был

сделан первый шаг в развитии ускорительной техники. В наше время гигантские ускорители стали обычным орудием исследования в области ядерной физики.

Ученики Резерфорда – Джон Кокрофт и Эрнест Уолтон, вдохновленные идеями своего учителя и при его большой поддержке, построили в Кавендишской лаборатории высоковольтную установку для разгона заряженных частиц – протонов. Протоны разгонялись до энергии 600 000 эВ, что для того времени было большим достижением. Работы Кокрофта, Уолтона и американского физика Лоуренса в Беркли (США) положили начало ускорительному веку в ядерной физике, высшим достижением которого сегодня является вводимый в строй Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider – LHC) в Женеве.

Первый генератор Кокрофта – Уолтона (многокаскадный умножитель напряжения), названный в честь этих двух физиков (рис. 6.1), был построен в 1932 г. и использован в качестве высоковольтного источника напряжения в ускорителе заряженных частиц (на 0,6 МэВ), предназначенного для проведения эксперимента по искусственному расщеплению атомных ядер.



Рис. 6.1. Один из умножителей напряжения, построенный в 1937 г. компанией Philips для использования в ускорителе на энергию в 1 МэВ. В настоящее время находится в Национальном музее науки в Лондоне. Такие ускорители в 40-е гг. прошлого столетия применялись при разработке атомной бомбы

Практически одновременно, 10 октября 1932 г., такой же эксперимент по расщеплению ядра лития искусственно ускоренными протонами был проведен в СССР, в Украинском физико-техническом институте (Харьков). Харьковские физики Александр Ильич Лейпунский, Кирилл Дмитриевич Синельников, Антон Карлович Вальтер и Георгий Дмитриевич Латышев всего лишь на пять месяцев отстали от Джона Кокрофта и Эрнеста Уолтона.

Кокрофт и Уолтон использовали этот каскадный умножитель напряжения в исследованиях, за которые получили Нобелевскую премию по физике 1951 г.: «за трансмутацию атомных ядер с помощью искусственно ускоренных атомных частиц». Менее известно, что принципиальная схема умножителя данного типа была разработана в 1919 г. швейцарским физиком Генрихом Грейнахером. По этой причине каскадный удвоитель данного типа иногда называют **умножителем Грейнахера**. Ускорители, построенные на подобном принципе, сейчас называются линейными.

Американский физик **Эрнест Орландо Лоуренс** построил первый в мире циклический ускоритель – **циклотрон**. Основная идея Лоуренса состояла в том, что **заряженные частицы движутся в однородном магнитном поле по окружностям**. Прикладывая переменное напряжение, так чтобы в нужный момент времени частица периодически ускорялась, можно достичь высоких энергий, используя гораздо меньшие напряжения, чем при линейном ускорении частиц. После первого, довольно несовершенного, циклотрона, построенного в 1930 г., Лоуренс и его коллеги из университета Беркли быстро создали одну за другой более крупные модели. Первый циклотрон ускорял протоны до энергии всего 1 МэВ (его диаметр был 25 см).

На рисунке 6.2 показана эта первая работающая модель циклотрона. На рисунке 6.3 – циклотрон следующего поколения, который позволял ускорять протоны и дейтроны до энергий в несколько МэВ. В нем был использован 80-тонный магнит, предоставленный Лоуренсу Федеральной телеграфной компанией. Лоуренс был удостоен Нобелевской премии по физике 1939 г. «за изобретение и создание циклотрона, за достигнутые с его помощью результаты, особенно получение искусственных радиоактивных элементов»



Рис. 6.2. Первая работающая модель циклотрона

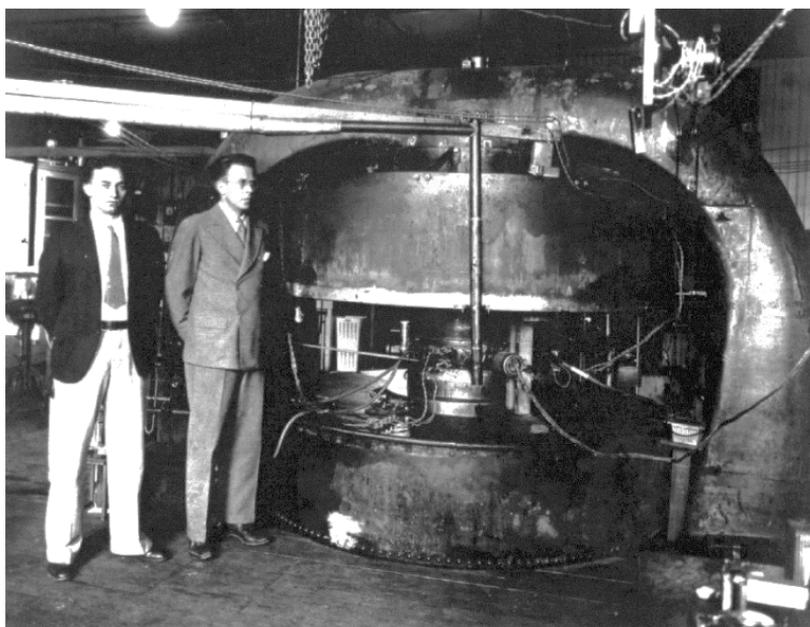


Рис. 6.3. С. Ливингстон и Э. Лоуренс у 27-дюймового циклотрона, который широко использовался в экспериментальных исследованиях ядерных реакций и искусственной радиоактивности

Принцип работы циклотрона

Схема устройства циклотрона показана на рис. 6.4. Тяжелые заряженные частицы (протоны, ионы) попадают в камеру из инжектора вблизи центра камеры и ускоряются переменным полем фиксированной частоты, приложенным к ускоряющим электродам (их два, и они называются дуантами).

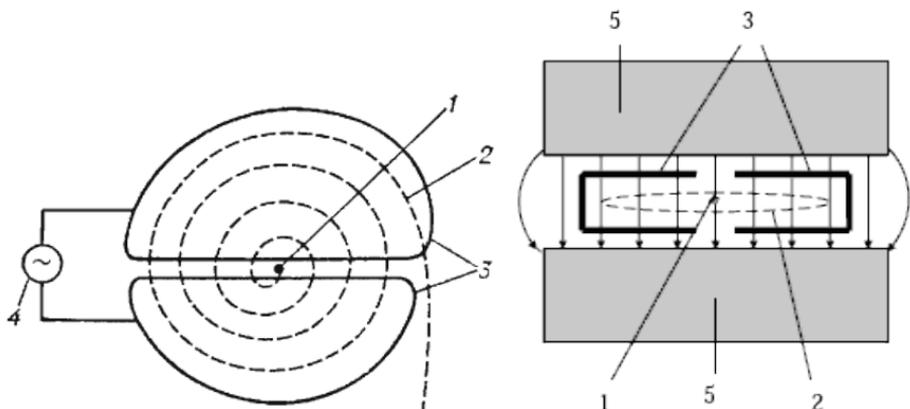


Рис. 6.4. Схема циклотрона, вид сверху (слева) и сбоку (справа): 1 – источник тяжелых заряженных частиц (протонов, ионов); 2 – орбита ускоряемой частицы; 3 – ускоряющие электроды (дуанты); 4 – генератор ускоряющего поля; 5 – электромагнит. Стрелки показывают силовые линии магнитного поля. Они перпендикулярны плоскости левого рисунка

Частицы с зарядом Ze и массой покоя m_0 движутся в постоянном магнитном поле напряженностью \mathbf{B} , направленном перпендикулярно плоскости движения частиц, по раскручивающейся спирали. Радиус R траектории частицы, имеющей скорость v , определяется из равенства центростремительной силы силе Лоренца, действующей на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле:

$$\frac{mv^2}{R} = \frac{Ze}{c} \left[\mathbf{v} \times \mathbf{B} \right] \Big|_{|\mathbf{v} \times \mathbf{B}| = vB} \Rightarrow \frac{ZevB}{c} \Rightarrow R = \frac{m_0 v c}{ZeB} \gamma, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где γ – релятивистский фактор (отношение релятивистской массы частицы к ее массе покоя).

В циклотроне для нерелятивистской ($\gamma \approx 1$) частицы в постоянном и однородном магнитном поле радиус орбиты пропорционален скорости, а период обращения

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m_0 c}{ZeB} \gamma \approx \frac{2\pi m_0 c}{ZeB}$$

не зависит от энергии частицы. В зазоре между дуантами частицы ускоряются импульсным электрическим полем (внутри полых металлических дуантов электрического поля нет). В результате энергия и радиус орбиты возрастают. Повторяя ускорение электрическим полем на каждом обороте, энергию и радиус орбиты доводят до максимально допустимых значений. На последнем витке спирали включается отклоняющее электрическое поле, выводящее пучок наружу. Постоянство магнитного поля и частоты ускоряющего поля делают возможным непрерывный режим ускорения. Пока одни частицы двигаются по внешним виткам спирали, другие находятся в середине пути, а третьи только начинают движение.

Недостатком циклотрона является ограничение существенно нерелятивистскими энергиями частиц, так как даже не очень большие релятивистские поправки (отклонения γ от единицы) нарушают синхронность ускорения на разных витках, и частицы с существенно возросшими энергиями уже не успевают оказаться в зазоре между дуантами в нужной для ускорения фазе электрического поля. В обычных циклотронах протоны можно ускорять до 20–25 МэВ.

Для ускорения тяжелых частиц в режиме раскручивающейся спирали до энергий, в десятки раз больших (вплоть до 1 000 МэВ), используют модификацию циклотрона, называемую *изохронным* (релятивистским) циклотроном, а также фазотрон (синхроциклотрон). В изохронных циклотронах релятивистские эффекты компенсируются радиальным возрастанием магнитного поля. В фазотроне магнитное поле однородно и постоянно во времени, меняется же частота ускоряющего электрического поля.

6.3. Первый эксперимент Резерфорда по расщеплению ядер азота

На рисунке 6.5 изображена схема собственноручно построенного Резерфордом прибора (рис. 6.6), с помощью которого ему удалось впервые расщепить ядра атомов легких элементов. Детали проведенных исследований и полученные результаты обсуждались в статье, вышедшей в 1919 г: « **Столкновения альфа-частиц с легкими атомами. IV. Аномальный эффект на азоте**». By Professor Sir E. Rutherford, F. R. S. The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 6th series. 1919. V. 37. P. 581.

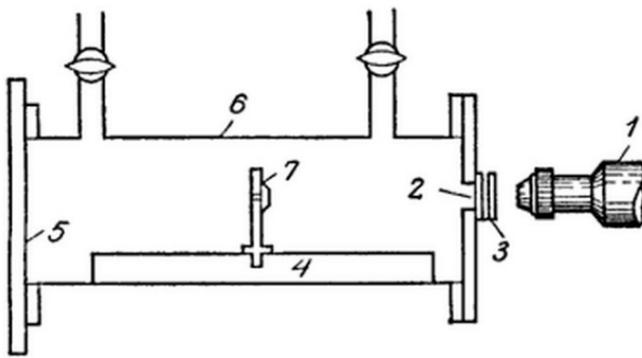


Рис. 6.5. Латунная трубка 6 длиной 20 см с двумя кранами наполняется газом. Внутри трубки находится диск радиоактивного излучателя 7, испускающего альфа-частицы. Диск этот укреплен на стойке,двигающейся по рельсу 4. Во время опыта один конец трубки закрывался матовой стеклянной пластинкой 5, а другой конец 2 – латунной пластинкой (прикрепляемой воском). Маленькое прямоугольное отверстие в латунной пластинке закрывалось серебряной пластинкой 3. Серебряная пластинка обладала способностью задерживать альфа-частицы с длиной пробега в слое воздуха толщиной примерно 6 см. Против отверстия помещался люминесцирующий экран из цинковой обманки (сернистого цинка ZnS). Для счета сцинтилляций использовалась зрительная труба 1

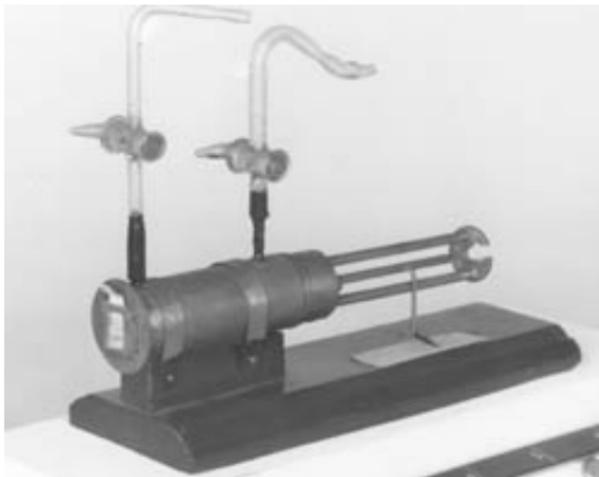


Рис. 6.6. Прибор, при помощи которого Резерфорд впервые наблюдал искусственную трансмутацию в 1919 г. В нем атомы азота превращались в атомы кислорода в результате столкновений с альфа-частицами от источника, расположенного внутри закрытой горизонтальной трубки. Протоны, образующиеся в процессе такой ядерной реакции, регистрировались через прямоугольное окно в торце трубки. Находится в Национальном музее науки в Лондоне

Суть работы состоит в следующем. Интенсивный радиоактивный источник Ra помещен внутри металлического сосуда приблизительно в 3 см от его доньшка с отверстием, которое закрывалось серебряной пластинкой с тормозной способностью останавливать альфа-частицы, эквивалентной слою воздуха толщиной 6 см. Снаружи на расстоянии около 1 мм от серебряной пластинки был смонтирован экран из сернистого цинка так, чтобы между ними можно было помещать поглощающие альфа-лучи фольги.

Вся установка была помещена в сильное магнитное поле, чтобы полностью отклонить бета-частицы. Исследовалось изменение числа «естественных» сцинтилляций в зависимости от поглощающей способности (выраженной в толщинах слоя воздуха) промежутка между источником и экраном. В одном случае воздух из сосуда был откачан и использовались поглощающие алюминиевые фольги. Во втором случае сосуд заполнялся либо осушенным от влаги кислородом, либо углекислым газом. При увеличении столба газа, проходимого альфа-частицей (этого можно достичь двумя способами: отодвигать источник от экрана и/или увеличивать давление), наблюдалось уменьшение числа сцинтилляций в точном соответствии с тормозной способностью слоя газа.

Сюрприз преподнес обычный осушенный воздух, когда сосуд наполнили им. Вместо уменьшения числа сцинтилляций оно увеличилось. При поглощающей способности, соответствующей 19 см воздушного столба, число сцинтилляций оказалось вдвое больше, чем в случае, когда воздух полностью откачан и когда все альфа-частицы достигают экрана! Откуда взялись такие длиннопробежные частицы? По яркости вспышки напоминали сцинтилляции от водорода: если альфа-частица ударяет по водороду, то он ионизируется (теряет электрон) и приобретает большую скорость (длина пробега у него гораздо больше, чем у альфа-частицы, поскольку заряд меньше). Попадая на экран, ядро водорода (протон) также дает вспышку, только менее яркую, чем альфа-частица. Водород есть в воде, но газы были специально осушены, чтобы исключить такие события. Были предприняты специальные измерения для выяснения причин таких сцинтилляций. Подобного типа вспышки могут давать и быстрые однозарядные ионы кислорода и азота, которые также могут появиться в результате удара альфа-частицы, однако их энергия такова, что они смогут пройти в воздухе только 9 см до полной остановки и никак не могут достичь экрана.

В конечном счете Резерфорд пришел к выводу, что эффект обусловлен именно столкновением альфа-частицы с ядром азота и она выбивает из него быстрый протон. Это было первое наблюдение ядерной реакции.



Эрнест Резерфорд – британский физик новозеландского происхождения – «маэстро атомной физики», создатель современной атомной физики, предвестник атомной эры, один из величайших ученых XX в. Лауреат нобелевской премии по химии 1908 г. «за проведенные им исследования в области распада элементов в химии радиоактивных веществ». В 1903 г. был избран членом Лондонского королевского общества, с 1925 по 1930 г. занимал пост его президента. В 1931–1933 гг. был президентом Института физики.

В 1914 г. Резерфорд был удостоен дворянского титула и становится сэром Эрнестом. 12 февраля в Букингемском дворце король посвятил его в рыцари: он был облачен в придворный мундир и препоясан мечом. Пэр Англии Резерфорд

Нельсонский (так стал называться великий физик после возведения в дворянское звание) стал бароном Резерфордом Нельсоном официально только в 1931 г., с утверждением соответствующего герба, который он увенчал птицей киви – символом Новой Зеландии.

Второй Ньютон, по словам Эйнштейна. Его еще называли «Планета по имени Атом».

Эрнест Резерфорд. Биографические сведения

Эрнест Резерфорд родился 30 августа 1871 г. в Новой Зеландии, неподалеку от г. Нельсона. Он был одним из 12 детей колесного мастера и строительного рабочего Джеймса Резерфорда, шотландца по происхождению, и Марты (Томпсон) Резерфорд, школьной учительницы из Англии. Сначала Эрнест посещал начальную и среднюю местные школы, а затем стал стипендиатом колледжа Нельсона. Благодаря успехам в учебе он получил еще одну стипендию, которая позволила ему поступить в Кентерберийский колледж в Крайстчерче, одном из крупнейших городов Новой Зеландии.

После того как в 1892 г. Резерфорду была присуждена степень бакалавра гуманитарных наук, остался в Кентерберийском колледже и продолжил свои занятия благодаря полученной стипендии по математике. На следующий год он стал магистром гуманитарных наук. Его магистерская работа касалась обнаружения высокочастотных радиоволн, существование которых было доказано около десяти лет назад. Для того чтобы изучить это явление, он сконструировал беспроволочный радиоприемник (за несколько лет до того, как это сделал Гульельмо Маркони) и с его помощью получал сигналы, передаваемые коллегами с расстояния полумили.

В 1894 г. ему была присуждена степень бакалавра естественных наук. Затем был удостоен стипендии Кембриджского университета в Англии, где он стал работать в Кавендишской лаборатории под руководством Дж. Дж. Томсона. Их сотрудничество увенчалось весомыми результатами, включая открытие Томсоном электрона – атомной частицы, несущей отрицательный электрический заряд. Опираясь на свои исследования, Томсон и Резерфорд выдвинули предположение, что, когда

рентгеновские лучи проходят через газ, они разрушают атомы этого газа, высвобождая одинаковое число положительно и отрицательно заряженных частиц. Эти частицы они назвали ионами. После этой работы Резерфорд занялся изучением атомной структуры.

В 1898 г. он принял место профессора Макгиллского университета в Монреале (Канада), где начал серию важных экспериментов, касающихся радиоактивного излучения элемента урана. Он открыл два вида этого излучения: альфа- и бета-лучи с разной проникающей способностью. Затем обнаружил, что радиоактивный торий испускает газообразный радиоактивный продукт, который он назвал «эманация» тория.

Дальнейшие исследования показали, что два других радиоактивных элемента – радий и актиний – также производят эманацию. На основании этих и других открытий Резерфорд пришел к двум важным для понимания природы радиации выводам: все известные радиоактивные элементы испускают альфа- и бета-лучи и, что еще более важно, радиоактивность любого радиоактивного элемента через определенный конкретный период времени уменьшается.

Опираясь на дальнейшие исследования, проведенные в Макгиллском университете в 1901–1902 гг., Резерфорд с Фредериком Содди изложили основные положения созданной ими теории радиоактивности, в соответствии с которой радиоактивность возникает тогда, когда атом отторгает частицу самого себя, которая выбрасывается с огромной скоростью, и эта потеря превращает атом одного химического элемента в атом другого. Выдвинутая Резерфордом и Содди теория вступала в противоречие с рядом ранее существовавших представлений, включая признаваемую всеми долгое время концепцию о неделимости и неизменяемости атомов.

В 1907 г. Резерфорд занимает пост профессора физики в Манчестерском университете (Англия). С участием Ханса Гейгера, который впоследствии прославился как изобретатель счетчика Гейгера, Резерфорд создал в Манчестере школу по изучению радиоактивности.

В 1908 г. Резерфорду была присуждена Нобелевская премия по химии «за проведенные им исследования в области распада элементов в химии радиоактивных веществ». В своей вступительной речи от имени Шведской королевской академии наук К. Б. Хассельберг указал на связь между работой, проведенной Резерфордом, и работами Томсона, Анри Беккереля, Пьера и Марии Кюри. «Открытия привели к потрясающему выводу: химический элемент... способен превращаться в другие элементы», – сказал Хассельберг. В своей нобелевской лекции Резерфорд отметил: «Есть все основания полагать, что альфа-частицы, которые так свободно выбрасываются из большинства радиоактивных веществ, идентичны по массе и составу и должны состоять из ядер атомов гелия».

6.4. Большой адронный коллайдер

В 2010 г. начался первый длительный сеанс научной работы на построенном самом мощном в мире ускорителе – Большом адронном коллайдере (БАК, или LHC). Это ускоритель заряженных частиц на встречных пучках, предназначенный для ускорения протонов и тяжелых ионов (ионов свинца), а также изучения продуктов их соударений. Проектная энергия

сталкивающихся протонов в каждом из пучков – $7 \text{ ТэВ} + 7 \text{ ТэВ}$, сталкивающихся ядер свинца – $2,76 \text{ ТэВ A} + 2,76 \text{ ТэВ A}$ (здесь A – атомная масса ядра, то есть энергия $2,76 \text{ ТэВ}$ на нуклон). При таких энергиях столкновения «расщепляются» на фрагменты сами протоны, а при столкновении ядер на короткий миг образуется вещество с громадной плотностью, в котором нет отдельных нуклонов, а имеется «суп» из кварков и глюонов (сейчас это вещество называется кварк-глюонной плазмой). Такое вещество было на ранних стадиях образования Вселенной. Затем происходит развал такого состояния на множество частиц. Действительно, при суммарной энергии сталкивающихся протонов в $14\,000 \text{ ГэВ}$ (а ядер – более миллиона ГэВ) в результате такого столкновения могут родиться десятки и сотни тысяч нуклонов, гиперонов и других частиц с самыми разными массами. Поэтому одной из главных задач в научной программе БАК является поиск новых частиц, которые предсказываются современными моделями элементарных частиц и их взаимодействий. Одной из таких частиц является бозон Хиггса, наличия которого требует современная Стандартная модель.

Изображение результата компьютерного моделирования процесса столкновения с рождением хиггсовского бозона приведено на рис. 6.7.

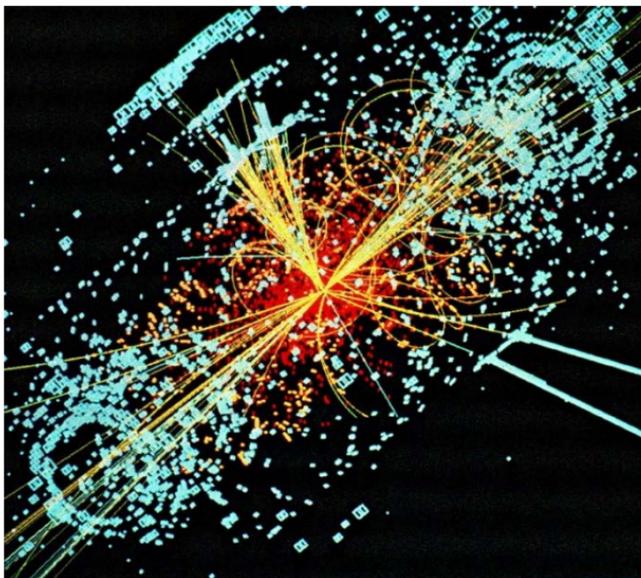


Рис. 6.7. Так выглядит моделирование процесса рождения бозона Хиггса вместе с огромным количеством других частиц в одном из четырех детекторов БАК – детекторе CMS

Другой, не менее важной задачей является исследование свойств кварк-глюонной плазмы, которая, как уже сейчас установлено, скорее является кварк-глюонной жидкостью, а не плазмой.

К 18 марта 2010 г. энергия каждого из пучков протонов была доведена до 3,5 ТэВ, а 3 июня 2015 г. вышли на энергию 6,5 ТэВ на пучок.

К началу 2011 г. уже опубликованы первые научные результаты, полученные на детекторах. Например, коллаборацией, работающей на LHCb, обнаружены новые, очень редкие каналы распадов «странно-прелестных» мезонов. Так называются мезоны, имеющие в своем составе как «странный» кварк (s), так и «прелестный» кварк (b). Интерес к ним связан с тем, что по картине их распада можно понять очень глубокие свойства нашего мира, такие как CP -нарушение, и увидеть проявления новых частиц или взаимодействий, поиском которых и занимается коллаборация LHCb.

На рисунке 6.8 показана реальная картина столкновения, полученная в июле 2010 г. в результате измерений на том же детекторе CMS.

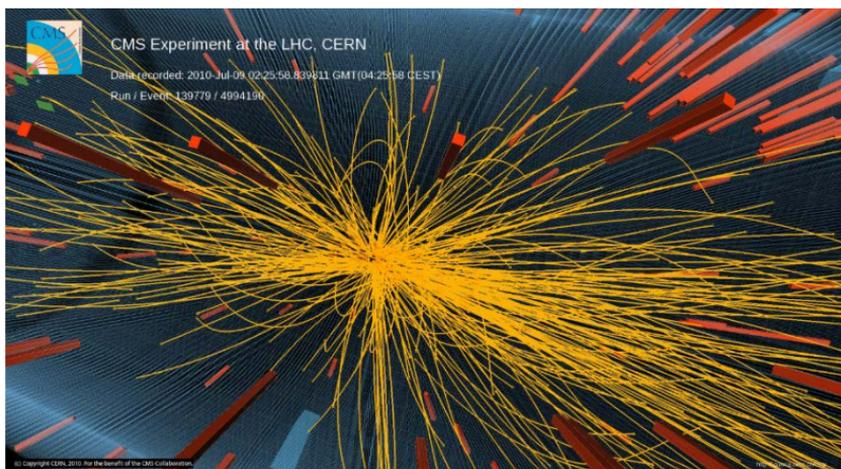


Рис. 6.8. Картина столкновения частиц высоких энергий

О том, сколько людей и научных организаций задействовано в экспериментах на БАК, свидетельствует список авторов одной из работ коллаборации, работающей на детекторе ALICE (опубликована http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/1004/1004.3514v2.pdf 21 мая 2010 г.). Этот список занимает две с половиной страницы текста статьи, и еще на трех страницах перечислены те институты и организации, которые приняли участие в подготовке и проведении эксперимента.

БАК построен в научно-исследовательском центре ЦЕРН (фр. *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, CERN), на границе Швейцарии и

Франции, недалеко от Женевы. Он является сейчас самой крупной экспериментальной установкой в мире. В строительстве и исследованиях участвовали и участвуют более 10 000 ученых и инженеров из более чем 100 стран.

Длина основного кольца ускорителя составляет 26 659 м; адронным он назван из-за того, что ускоряет адроны, то есть сильно взаимодействующие частицы, состоящие из кварков; коллайдером (англ. *collide* – сталкиваться) – из-за того, что пучки частиц ускоряются в противоположных направлениях и сталкиваются в специальных точках столкновения (рис. 6.9).

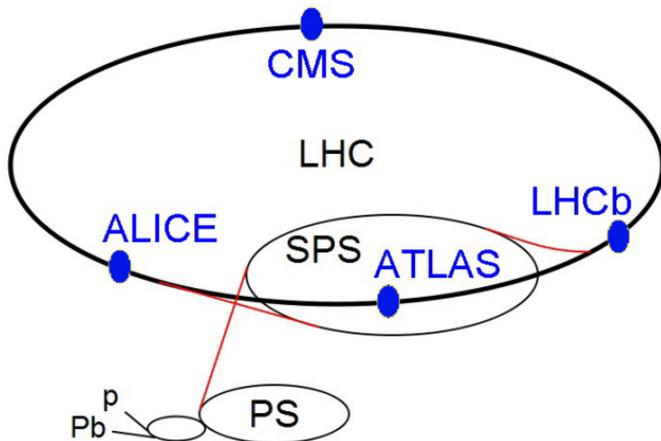


Рис. 6.9. Детекторы и предускорители БАК. Траектория протонов p (и тяжелых ионов свинца Pb) начинается в линейных ускорителях (в точках p и Pb соответственно). Затем частицы попадают в бустер протонного синхротрона (PS), через него – в протонный суперсинхротрон (SPS) и, наконец, непосредственно в туннель БАК. Вспомогательные детекторы TOTEM и LHCf, отсутствующие на схеме, находятся рядом с детекторами CMS (рис. 6.10) и ATLAS (рис 6.11) соответственно

Таких точек четыре, и в каждой из них находятся детекторы частиц, представляющие собой очень сложные и крупные экспериментальные комплексы, в которых использованы самые современные технологии и последние достижения науки и техники (рис. 6.10–6.17). Они предназначены для регистрации частиц, определения их траекторий, импульсов, энергий, масс, зарядов, идентификации этих частиц, то есть должны отличать одни частицы от других, что при таких высоких энергиях само по себе является очень сложной задачей.

Следующие фотографии и схемы (рис. 6.10–6.19) дают представление о масштабах размеров ускорителя и этих детекторов.

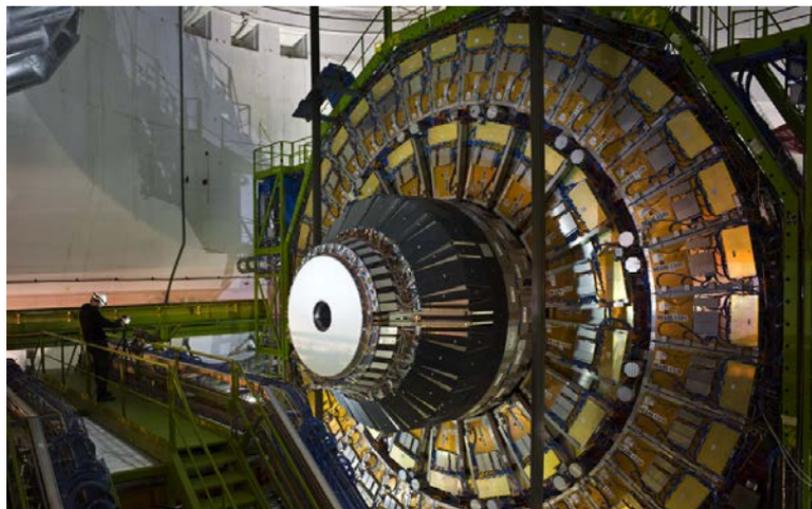


Рис. 6.10. Спуск детектора CMS в подземный экспериментальный зал (Mona Schweizer, © CERN)

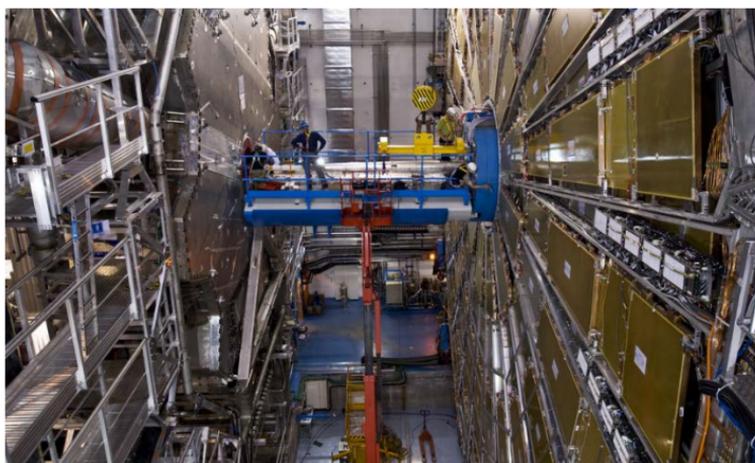


Рис. 6.11. Монтаж трубы для проводки пучков протонов и ядер в подземном зале детектора ATLAS (Maximilien Brice, © CERN)

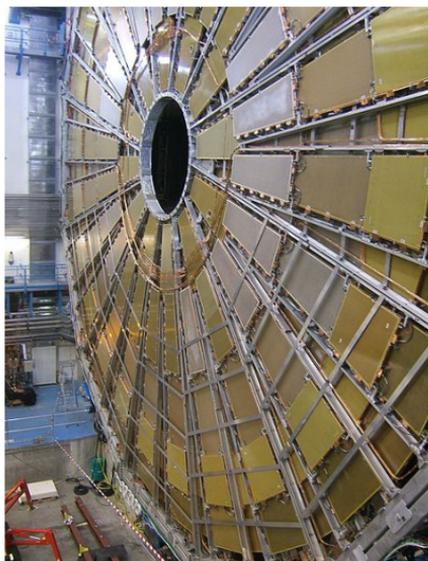


Рис. 6.12. Часть детектора ATLAS,
ноябрь 2006

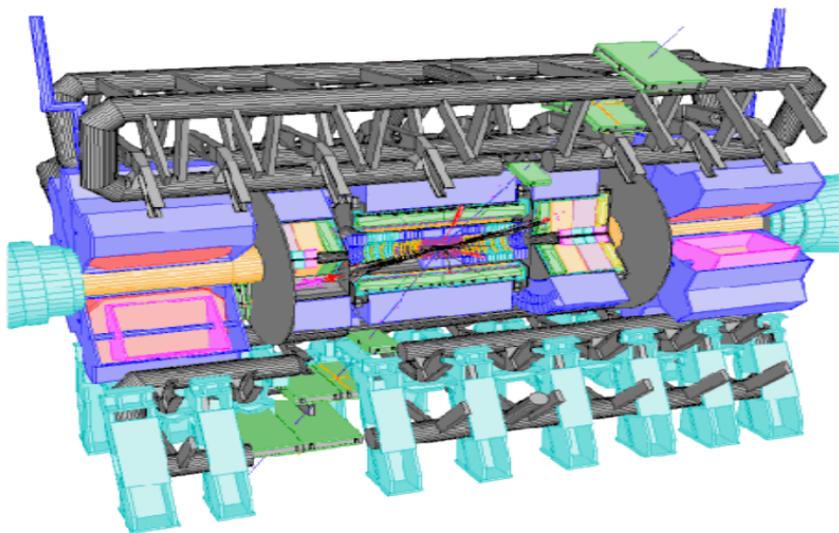


Рис. 6.13. Схема детектора ATLAS

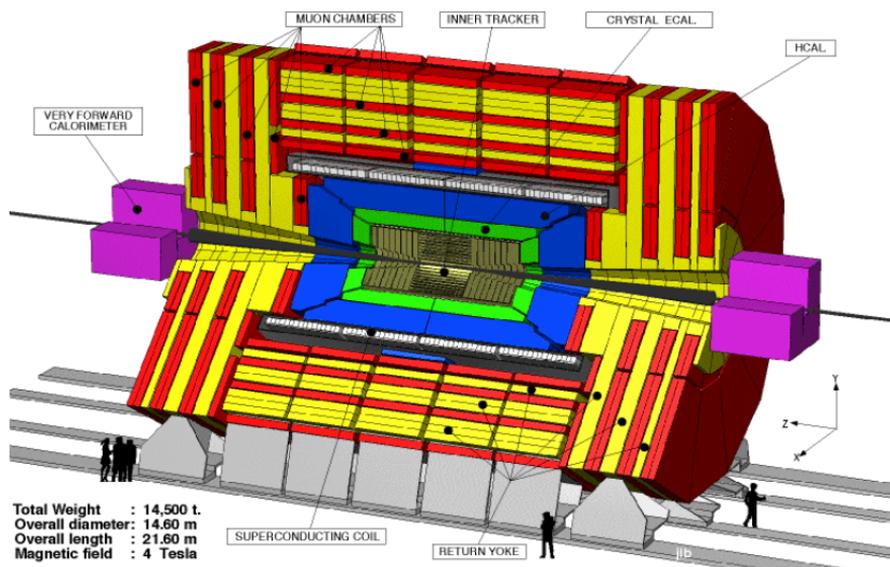


Рис. 6.14. Схема детектора CMS

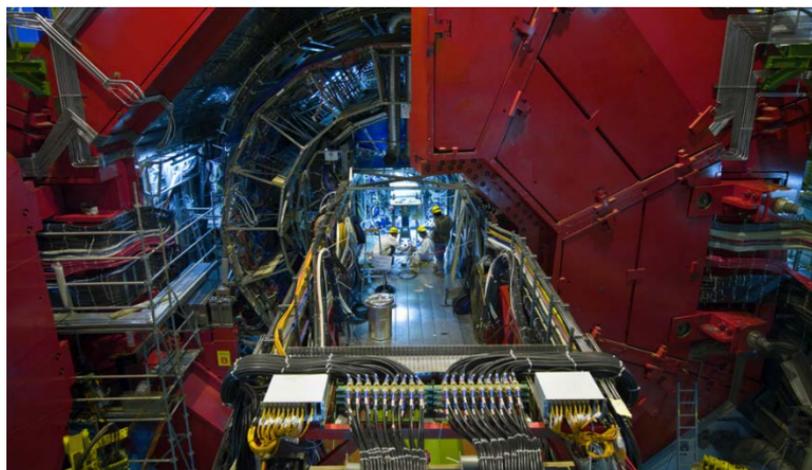


Рис. 6.15. Магнит детектора ALICE в подземном зале
(Mona Schweizer, © CERN)

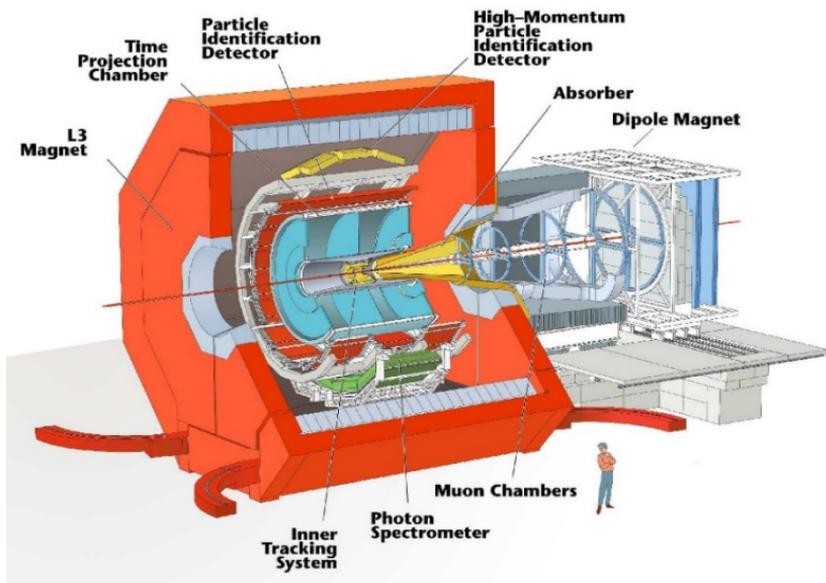


Рис. 6.16. Схема детектора ALICE

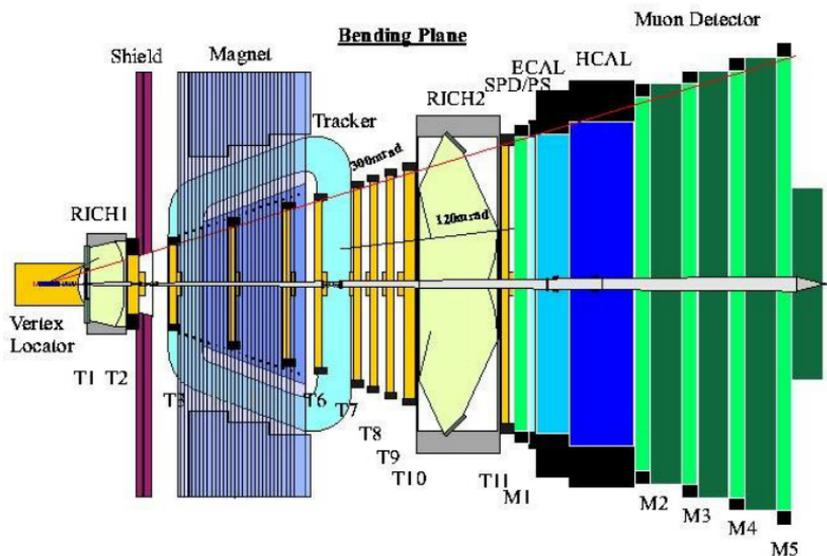


Рис. 6.17. Схема детектора LHCb



Рис. 6.18. 27-километровый подземный туннель, предназначенный для размещения ускорителя БАК. Туннель после демонтажа LEP



Рис. 6.19. Смонтированные криомагниты для поворота пучков ускоряемых протонов в туннеле БАК (Maximilien Brice, © CERN)

Протонный пучок не является однородным и непрерывным. Он разбит на отдельные сгустки протонов (банчи), которые летят друг за другом на некотором расстоянии. Каждый сгусток – это тончайшая «протонная иголка» длиной несколько десятков сантиметров и толщиной в доли миллиметра. По расчетам в максимуме производительности БАК каждый из двух встречных пучков будет состоять из 2 808 банчей, идущих друг за другом на расстоянии в несколько метров (минимальный промежуток времени между банчами – 25 нс), а в каждом сгустке будет примерно по 100 миллиардов протонов. На ноябрь 2010 г. среднее число протон-протонных столкновений в банче было 2,5, каждый пучок состоит из 350 банчей, время между банчами – 75 нс.

Ускоритель расположен в том же туннеле (рис. 6.18, 6.19), который прежде занимал Большой электрон-позитронный коллайдер (LEP), проект которого был предложен в начале 1980-х гг. для осуществления столкновений электронов и их античастиц – позитронов. Осенью 1983 г. началось строительство LEP. В долине Женевского озера на глубине ста метров был вырыт кольцевой туннель общей длиной 26,7 км. Качество подземных работ было столь высоким, что, когда в 1988 г. два конца туннеля соединились, расхождение между ними составило всего один сантиметр. Туннель был проложен под землей на территории Франции и Швейцарии. Глубина залегания туннеля – от 50 до 175 м, причем кольцо туннеля наклонено примерно на 1,4 % относительно поверхности земли (это перепад по высоте около 200 м). Использование того же туннеля под ЛHC весьма существенно удешевило строительство нового коллайдера.

На коллайдере ЛHC для удержания, коррекции и фокусировки протонных пучков используются 1 624 сверхпроводящих магнита, общая длина которых превышает 22 км. Магниты работают при температуре 1,9 К ($-271\text{ }^{\circ}\text{C}$), что немного ниже температуры перехода гелия в сверхтекучее состояние.

Россия, в том числе и НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, принимала активное участие как в строительстве БАК, так и в создании всех детекторов, которые работают на коллайдере.

Четвертого июля 2012 г. произошло событие, имеющее выдающееся значение для физики: на семинаре в ЦЕРН коллаборациями ATLAS и CMS было объявлено об открытии новой частицы, которая, как осторожно заявили авторы, по своим свойствам соответствует теоретически предсказанному элементарному бозону Стандартной модели – бозону Хиггса. Нобелевская премия по физике 2013 г. была присуждена Франсуа Энглеру и Питеру Хиггсу за предсказание этого бозона.

В марте 2015 г. ATLAS и CMS уточнили данные по массе бозона: $125,09 \pm 0,24\text{ ГэВ}/c^2$, что примерно на 0,2 % точнее предыдущего значения.

На прошедшей в марте 2017 г. серии конференций Moriond-2017 была представлена масса $125,26 \pm 0,20 \pm 0,08 \text{ ГэВ}/c^2$ (по данным LHC за 2016 г.).



Рис. 6.20. Национальная ускорительная лаборатория им. Энрико Ферми. Кольцо Теватрона (фото Reidar Hahn)

Самым крупным ускорителем до БАК был Теватрон (англ. *Tevatron*) – кольцевой ускоритель-коллайдер, расположенный в Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми (Фермилаб) в городке Батавия штата Иллинойс, недалеко от Чикаго. Теватрон ускоряет заряженные частицы – протоны и антипротоны – в подземном кольце длиной 6,3 км до энергии 980 ГэВ ($\sim 1 \text{ ТэВ}$), см. рис. 6.20.

Часть 7. НЕЙТРОНЫ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

7.1. Открытие нейтрона

В 1932 г., 17 февраля, Джеймс Чедвик направил в печать свою статью «*Возможное существование нейтрона*» (“Possible Existence of a Neutron”. Nature. 1932. V. 129. P. 312), которая открыла новую, ядерную эру в истории развития человечества.

Через три года он был удостоен Нобелевской премии «...за открытие нового фундаментального кирпичика мироздания, из которых построены атомы и молекулы, а именно за открытие так называемого нейтрона. Интуиция, мысль и логика вместе с искусством эксперимента позволили профессору Чедвику доказать существование нейтрона и установить его свойства...» (из речи председателя Нобелевского комитета по физике Х. Плайджела на церемонии вручения Нобелевской премии 1935 г.).

Следующие 15 лет ознаменовались цепочкой удивительных открытий и событий, связанных с новой частицей, которые определили дальнейшее развитие мировой науки и всего человечества в целом.



Сэр Джеймс Чедвик (*Sir James Chadwick*; 1891–1974) – английский физик, первым обнаруживший удивительное явление, оставшееся загадкой в течение почти 30 лет: непрерывность спектра бета-частиц при бета-распаде ядер (1914). Более известен за открытие нейтрона (1932). Член Лондонского королевского общества (1927), лауреат Нобелевской премии по физике 1935 г., ученик Э. Резерфорда. Окончил Манчестерский и Кембриджский университеты.

7.1.1. Сюрпризы и новые открытия

Сначала кратко перечислим те сюрпризы, которые преподнесла эта удивительная частица – нейтрон, и обсудим связанные с этим открытием новые идеи и физические представления, которые определили дальнейшее развитие нашего понимания строения материи.

1. Нейтральная элементарная частица?! Само наличие такой частицы противоречило представлениям того времени, согласно которым **ряд был неотъемлемым свойством** частиц вещества. Тогда господствовала протон-электронная модель ядра, считалось, что **ядра атомов состоят из протонов (p) и электронов (e)**, поскольку было известно, что из ядер вылетают электроны (при β -распаде ядер) и протоны (при облучении ядер альфа-частицами).

Резерфорд даже предположил (1920) возможность существования нейтрона (n) как некоторого компактного (в отличие от атома водорода) связанного состояния протона и электрона (pe).

Однако протон-электронная модель ядра имела ряд неразрешимых противоречий, например одно из них даже имело громкое название «азотная катастрофа». Суть его в следующем. По этой модели ядро азота $^{14}_7\text{N}$ должно содержать 14 протонов и 7 электронов. Спины протона и электрона полуцелые (равны $\frac{1}{2}$), следовательно, спин ядра азота должен быть полуцелым. Из эксперимента же по изучению оптических спектров атома азота следовало, что спин целый. И еще было совершенно не понятно, куда же девается магнитный момент электрона внутри ядра. Он ведь в 1 800 раз больше протонного, а магнитные моменты ядер имеют тот же порядок, что и магнитный момент протона.

2. Ядра состоят из протонов и нейтронов. Выход из положения нашел Дмитрий Дмитриевич Иваненко. В 1932 г. он опубликовал статью, в которой предположил, что ядро состоит из протонов и нейтронов (со спином $\frac{1}{2}$), а вовсе не из протонов и электронов! Гипотеза сразу дала решение указанных выше проблем.

Статья в Nature была подписана Д. Д. Иваненко 21 апреля 1932 г. и опубликована 28 мая. Два месяца спустя Вернер Гейзенберг в своей работе (подписанной 10 июня 1932 г.) уже цитирует Иваненко и поддерживает его идею.

Нужно заметить, что гипотеза о том, что ядро не только не содержит электроны, но должно содержать кроме протонов некие нейтральные частицы, была высказана В. А. Амбарцумяном и Д. Д. Иваненко еще в 1930 г. – в противовес электрон-протонной модели (см. ДАН СССР, сер. А. 1930. № 6. С. 153). Таким образом, они предсказали существование нейтрона за два года до его открытия Дж. Чедвиком. Эта работа, несомненно, может быть включена в список наиболее выдающихся работ по строению атомного ядра.

3. Частицы могут рождаться и исчезать (как фотоны). В связи с обсуждением бета-распада ядер в 1930 г. В. А. Амбарцумян и Д. Д. Иваненко предположили возможность рождения и исчезновения любых (в том числе и массивных) частиц (*Comptes Rendus Sci. Paris*, 1930. V. 190. P. 582), а не только фотонов, в результате их взаимодействий. То есть при бета-распаде электрон именно рождается (вместе с антинейтрино) в результате перехода ядра из одного состояния в другое, а не просто вылетает из ядра, как находящаяся в нем частица.

Вот что сказал Д. Д. Иваненко на Всесоюзной ядерной конференции в 1933 г. в Ленинграде с участием известных советских и иностранных физиков, в том числе П. Дирака, Ф. Жолио-Кюри, Ф. Перрена и других: «Появление электронов, позитронов и пр. следует трактовать как своего рода рождение частиц, по аналогии с излучением светового кванта, также не имевшего индивидуального существования до испускания из атома».

В 1933 г. Ферми построил теорию бета-распада на основе именно этой идеи, приняв также гипотезу В. Паули о существовании невидимой безмассовой нейтральной частицы – нейтрино. Таким образом, по Ферми, нуклон из одного состояния (нейтрон) переходит в другое состояние с меньшей энергией (протон), и при этом излучается (рождается) пара частиц – электрон и антинейтрино, аналогично тому как атом при переходе из одного состояния в другое излучает фотон. Сейчас ключевая мысль о возможности рождения и исчезновения частиц – основа современных представлений об их фундаментальных взаимодействиях.

4. Изоспиновая инвариантность. Гейзенберг в том же 1932 г. пошел еще дальше. Он предположил, что протон (p) и нейтрон (n) – разные состояния одной частицы – нуклона, и ввел для него новую характеристику – **изоспин**, у которого, по аналогии с обычным спином, имеется две проекции, $+1/2$ и $-1/2$, соответствующие протону и нейтрону. Если бы не было электромагнитных взаимодействий (электрического заряда), отличить протон от нейтрона было бы невозможно. С точки зрения сильных взаимодействий, которые удерживают ядро от развала, несмотря на колоссальные кулоновские силы отталкивания между протонами, протон и нейтрон абсолютно одинаковы.

В этом суть так называемой изоспиновой инвариантности, которая нарушается электромагнитным взаимодействием. Обобщение идеи изоспиновой инвариантности – основа современной Стандартной модели элементарных частиц и их взаимодействий.

5. Действительно, нейтрон – нейтральная частица. Уточнение массы нейтрона (Чедвик, Гольдхабер, 1934) показало, что масса нейтрона больше суммарной массы протона и электрона, откуда следовало, что, во-первых, нейтрон – **нейтральная** элементарная частица, а не связанное со-

стояние протона и электрона, как считалось до этого с 1920 г., когда Резерфорд выдвинул гипотезу о нейтроне как о таком компактном связанном состоянии. Это разрушало сложившееся представление о том, что заряд есть неотъемлемое свойство частиц, из которых построен наш мир. Во-вторых, возникло предположение (Ф. Жолио-Кюри, 1934), что нейтрон должен быть нестабилен и должен распадаться на протон и электрон. Это предположение подтвердилось в 1948–1950 гг. открытием бета-распада нейтрона (независимо А. Снелл (США), Дж. Робсон (Канада) и П. Е. Спивак (СССР)).

6. Ядерные силы. Чем же удерживаются нуклоны в ядрах, что это за силы? Такое взаимодействие должно обладать характерными особенностями: на расстояниях, больших размера ядра (оно должно практически отсутствовать, поскольку опыты по рассеянию альфа-частиц в этой области ничего, кроме кулоновского взаимодействия, не обнаруживают); внутри ядра оно должно быть очень сильным, чтобы преодолеть кулоновское отталкивание между протонами (поэтому такое взаимодействие называется **сильным**). Для его объяснения советские ученые И. Е. Тамм и, независимо, Д. Д. Иваненко в 1934 г. впервые построили теорию взаимодействия, основанную на обмене нуклонов частицами конечной массы. Они предположили, что такими переносчиками взаимодействия могут быть упомянутые возникающие в слабом взаимодействии электрон-antineйтринные пары, которыми могут обмениваться нуклоны. Однако оказалось, что такие силы не обладают необходимыми свойствами. Тем не менее, опираясь на их работы, японский ученый Хидэки Юкава в 1935 г. выдвинул гипотезу о существовании новой элементарной частицы – мезона с массой, промежуточной между массами электрона и протона (от греч. *mesos* – средний, промежуточный), – обмен которой и приводит к взаимодействию с нужными свойствами.

В 1947 г. такие частицы (пи-мезоны) были обнаружены в космических лучах (следует отметить, что сначала в качестве кандидата в переносчики ядерного взаимодействия рассматривался открытый в 1937 г., также в космических лучах, мюон, который, как выяснилось позднее, является более тяжелым аналогом электрона).

В 1949 г. за предсказание существования мезонов и теоретические исследования природы ядерных сил (за счет обмена частицей, комптоновская длина волны которой определяет радиус действия этих сил) Юкаве была присуждена Нобелевская премия по физике (это была первая Нобелевская премия, присужденная японскому физики).

7. Структура элементарных частиц. В 1933–1934 гг. практически одновременно разными учеными в нескольких лабораториях была высказана гипотеза о наличии у нейтрона магнитного момента. Впервые, в 1933 г., – американцем Робертом Бэчером из Мичиганского университета (“Note on the Magnetic Moment of the Nitrogen Nucleus”. *Phys. Rev.* 1933. V. 43. P. 1001).

Он обратил внимание на необычайно малый магнитный момент ядра атома азота ^{14}N , состоящего из 7 нейтронов и 7 протонов, то есть имеющего 1 нечетный протон и нейтрон.

Измерение сверхтонкой структуры оптических линий атома ^{14}N дали очень малую величину магнитного момента его ядра: $\mu \leq 0,2\mu_N$ (μ_N – ядерный магнетон – величина, характеризующая магнитный момент протона, см. ниже), откуда Бэчер сделал вывод, что при определенных предположениях о структуре ядра азота (спин равен 1, то есть спины нечетных протона и нейтрона параллельны) можно прийти к заключению, что у нейтрона имеется магнитный момент, направленный против его спина (в отличие от протона) и по величине имеющий порядок ядерного магнетона $\mu_n \sim \mu_N$. Поэтому магнитные моменты нечетных протона и нейтрона в ядре направлены в противоположные стороны (при параллельных спинах) и компенсируют друг друга почти полностью.

В 1934 г. в ДАН СССР появилась работа С. А. Альтшуллера и И. Е. Тамма «Магнитный момент нейтрона» (ДАН СССР. 1934. Т. 1. С. 455), в которой они из данных по магнитным моментам ядер, известных из спектров атомов (из сверхтонких расщеплений оптических линий), также пришли к выводу о наличии у нейтрона отрицательного магнитного момента $\mu_n \sim -0,5\mu_N$.

Наиболее убедительными явились аргументы И. Эстермана и О. Штерна, которые опирались на измерения магнитных моментов протона и дейтона (связанного состояния p и n). В 1934 г. эти измерения дали два удивительных результата. Оказалось, что магнитный момент протона вдвое больше, чем предсказывала теория Дирака (1928), которая с потрясающей точностью описывала магнитный момент электрона. А сравнение магнитных моментов протона и дейтона привело к выводу, что у нейтрона имеется магнитный момент (Отто Штерн, Иммануэль Эстерман и Отто Фриш).

Развитая О. Штерном с сотрудниками техника измерения магнитных моментов молекул путем отклонения молекулярного пучка в неоднородном магнитном поле (метод Штерна – Герлаха) позволила измерить магнитный момент протона и дейтона. Было обнаружено существенное различие этих величин (магнитный момент дейтона оказался значительно меньше, чем у протона). А ведь если n – элементарная частица с зарядом 0, то, казалось бы, у нее не должно быть никакого магнитного момента, ведь магнитный момент есть следствие движения электрических зарядов, следовательно, магнитные моменты протона и дейтона должны совпадать. В то же время большую разницу в магнитных моментах протона и дейтона получила и группа Исидора Айзека Раби, которая измеряла магнитные моменты другим способом: по прецессии спина в магнитном поле.

И вот в работе Эстермана и Штерна, доложенной в апреле 1934 г. на заседании Американского физического общества, было высказано предположение, что магнитный момент дейтона должен быть равен сумме магнитных моментов протона и нейтрона. И у нейтрона имеется магнитный момент, направленный против спина. Авторы оценили его величину μ_n в 1,5–2 ядерных магнетона.

Прямое измерение магнитного момента нейтрона было проведено лишь в 1940 г. Луисом Альваресом и Феликсом Блохом, которые, измеряя угол поворота спина нейтрона в магнитном поле, получили величину $\mu_n = (-1,935 \pm 0,030) \mu_N$.

Спрашивается: откуда у нейтральной элементарной частицы может взяться магнитный момент, ведь магнитный момент есть следствие электрического тока (то есть движения заряженных частиц) внутри частицы? Тем более что в 1928 г. Дирак написал свое знаменитое релятивистское уравнение для частиц со спином $1/2$ (электронов, например), из которого однозначно следовала связь между зарядом и магнитным моментом частицы. Для электрона дираковский магнитный момент с точностью до 0,001 совпал с экспериментально измеренным. Он назван магнетон Бора.

Для протона дираковский магнитный момент называется ядерным магнетон, и он оказался почти в два раза меньше экспериментального. Для нейтральных элементарных частиц, по Дираку, магнитный момент должен отсутствовать.

В настоящее время можно утверждать, что это действительно так. По современным представлениям и протоны, и нейтроны (в том числе пи-мезоны) состоят из бесструктурных точечных (с размерами меньше, чем 10^{-16} см) частиц. Это верхний (*up*) и нижний (*down*) кварки, кратко *u* и *d*, с дробными зарядами $e_u = 2/3e$, $e_d = -1/3e$ и спинами $s = 1/2$. Таким образом, протон состоит из двух верхних и одного нижнего кварков: $p = uud$, а нейтрон – из двух нижних и одного верхнего: $n = udd$.

В 1944 г. О. Штерн был удостоен Нобелевской премии по физике 1943 г. «за вклад в развитие метода молекулярных пучков и открытие и измерение магнитного момента протона». Из-за условий военного времени обычная церемония вручения премии не проводилась, и она была передана Штерну во время завтрака, организованного Американско-скандинавским фондом в отеле Уол-Дорф-Астория в Нью-Йорке. Нобелевскую лекцию «Метод молекулярных пучков» Штерн прочитал только в 1946 г.

В 1952 г. Нобелевской премии по физике был удостоен и Феликс Блох (совместно с Э. М. Парселлом) «за развитие новых методов для точных ядерных магнитных измерений и связанные с этим открытия». В 1968 г. Луис Альварес был также удостоен Нобелевской премии по физике «за открытие множества резонансных состояний, сделавшее возможным использование водородных пузырьковых камер, и анализ данных».

8. Смешивание кварков. Изучение бета-распада нейтрона привело еще к одному открытию. Распад нейтрона, то есть его превращение в протон, электрон и антинейтрино, происходит следующим образом. Один из нижних кварков нейтрона – d в результате слабого взаимодействия превращается в верхний – u с испусканием лептон-антилептонной пары – электрона и антинейтрино. Точное измерение времени жизни нейтрона привело к неожиданному результату. Оказалось, что в нейтроне присутствует небольшая примесь к d -кварку так называемого странного кварка (s -кварк с зарядом $-1/3e$), который принадлежит второму поколению кварков и не может распадаться в кварк u первого поколения. Такая примесь слегка затрудняет распад и приводит к небольшому увеличению времени жизни нейтрона, которое и удалось измерить в эксперименте.

Дальнейшее развитие идеи о смешивания кварков, принадлежащей итальянскому физiku Николе Каббиво, увенчалось присуждением Нобелевской премии 2008 г. двум японским физикам: Макото Кобаяши из Исследовательского центра ускорителей высокой энергии (Цукуба) и Тосихидэ Маскава из Института теоретической физики (Университет Киото) за «открытие происхождения нарушенной симметрии, предсказывающей существование в природе по меньшей мере трех семейств кварков».

7.1.2. Новая, ядерная эпоха

Никто из присутствовавших на торжествах по поводу вручения Дж. Чедвику Нобелевской премии 1935 г., по всей видимости, не подозревал, что в истории наступила новая эра. Одно из самых важных для человечества открытий XX в. – открытие в 1939 г. деления ядер урана под действием нейтронов (Отто Ган и Фриц Штрассман, Лиза Мейтнер и Отто Фриш) – также явилось прямым следствием открытия нейтрона. Управляемые цепные реакции деления легли в основу ядерной энергетики.

Ядерную энергию удалось впервые освободить в 1942 г., когда Энрико Ферми осуществил управляемую цепную реакцию в первом атомном реакторе. 16 июля 1945 г. в США был проведен первый испытательный взрыв ядерной бомбы, а 6 и 9 августа, в самом конце Второй мировой войны, были сброшены ядерные бомбы на японские города Хиросиму и Нагасаки. Ядерное пламя практически мгновенно смело эти города с лица земли и поглотило более ста тысяч человеческих жизней. Несколько сот тысяч человек умерло от радиоактивного заражения в течение последующих нескольких лет. Такое завершение Второй мировой войны показало реальную угрозу для существования человеческой цивилизации от источника энергии такой невиданной концентрации, который оказался в ее руках. Поэтому сейчас, когда накоплен огромный ядерный арсенал, необходимо осознавать важность

ядерной науки и понимать, что любая неосторожность – случайная, умышленная или по безграмотности – в действиях отдельных личностей или правительств является преступной и может привести к быстрой гибели всего человечества.

В 1954 г. в СССР была построена и введена в эксплуатацию первая атомная электростанция. С этого момента человек перестал зависеть от энергии Солнца, поскольку все прежние виды энергии были так или иначе связаны с использованием накопленной солнечной энергии.

Уголь и нефть возникли благодаря органической жизни, которая сама появилась при непосредственном участии Солнца, так как фотосинтез у растений происходит при воздействии ультрафиолетовых лучей. Ветры, бури, циклоны, движение рек – вся эта гигантская движущаяся машина возникает также в результате действия энергии солнечных лучей.

С открытием ядерной энергии человечество, в принципе, получило возможность стать независимым от энергии солнечной.

Итак, перечислим наиболее важные события, происшедшие за 25 лет с момента открытия нейтрона, которые фактически определили лицо современной цивилизации:

- 1932 г. – открытие нейтрона (Дж. Чедвик);
- 1938 г. – деление ядер нейтронами (Отто Ган и Фриц Штрассман, Лиза Мейтнер и Отто Фриш);
- 1939 г. – Э. Ферми (США), Г. Н. Флеров и Л. И. Русинов (СССР): при делении урана нейтронами (быстрыми и медленными) могут испускаться быстрые нейтроны;
- после открытия в конце 1938 г. деления ядер урана под действием медленных нейтронов И. В. Курчатов инициирует широкое развитие в СССР работ по новому направлению. Независимо от Ферми сотрудники Курчатова – Г. Н. Флеров и Л. И. Русинов обнаружили испускание нейтронов при делении ядер урана;
- в 1939 г. сотрудники Курчатова – Ю. Б. Харитон и Я. Б. Зельдович предложили и представили расчет цепной реакции деления урана нейтронами;
- в ноябре 1940 г. на пятом и последнем перед войной Всесоюзном совещании по физике атомного ядра в Москве, где деление урана обсуждалось открыто, И. В. Курчатов выступил с докладом «Деление тяжелых ядер». Характеризуя условия осуществления цепной реакции деления, он выдвинул задачу создания уранового ядерного реактора как путь к практическому использованию ядерной энергии. Однако Великая Отечественная война прервала эти исследования, к которым вернулись лишь в апреле 1943 г. В докладной за-

писке 1943 г. Курчатов отмечал, что на июнь 1941 г. советские физики уже изучали конкретные схемы осуществления цепных реакций в естественном металлическом уране, в металлическом уране-235, в смеси из естественного урана и тяжелой воды, в смеси из естественного урана и углерода;

- 1942 г. – первый ядерный реактор (Э. Ферми, США);
- 1945 г., 16 июля – первый ядерный взрыв (США) (СССР – 29 августа 1949 г., плутониевая бомба);
- 1946 г., 25 декабря – заработал созданный И. В. Курчатовым и его сотрудниками первый физический уран-графитовый реактор Ф-1, работающий и в настоящее время (рис. 7.1);
- 1949 г. – первый в СССР (и Европе) тяжеловодный исследовательский ядерный реактор (А. И. Алиханов);
- 1952 г., 1 ноября – первый термоядерный взрыв (США);
- 1953 г., 12 августа – первая в мире транспортабельная водородная бомба (СССР);
- 1954 г. – первая атомная электростанция (Д. И. Блохинцев, И. В. Курчатов, Н. А. Доллежалъ, С. М. Фейнберг, СССР; рис. 7.2);
- 1954 г. – первая в мире атомная подводная лодка USS Nautilus (SSN-571) спущена на воду в США (рис. 7.3);
- 1958 г. – первая советская атомная подводная лодка «Ленинский комсомол», в конце 1958 г. успешно прошла испытания и была передана флоту в опытную эксплуатацию (И. В. Курчатов, А. П. Александров, Н. А. Доллежалъ; рис. 7.4);
- 1959 г., 3 декабря – первый атомный ледокол «Ленин» сдан Министерству морского флота СССР (В. И. Неганов, И. И. Африканов; рис. 7.5).

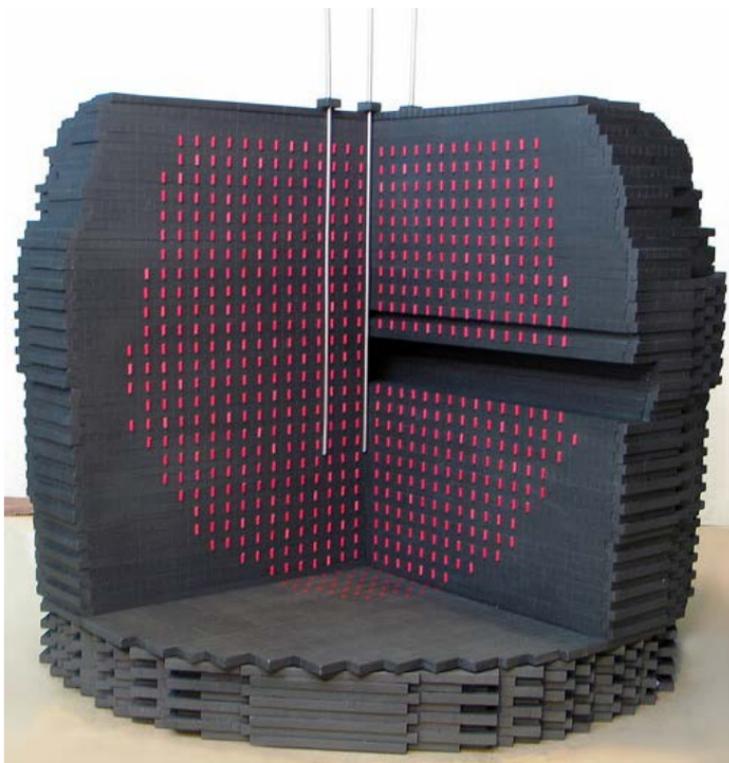


Рис. 7.1. Макет первого в СССР курчатовского ядерного реактора Ф-1. Всего для реактора понадобилось около 500 т особо чистого графита и 50 т урана. Собран он из графитовых кирпичей с цилиндрическими полостями, куда вставлены цилиндры из металлического урана (указаны красным). Ф-1 является старейшим в мире действующим реактором, который продолжает успешно работать со дня своего первого пуска в декабре 1946 г. Высокая стабильность воспроизведения заданного значения нейтронного потока позволила аттестовать реактор Ф-1 в качестве «Рабочего эталона единицы плотности потока тепловых нейтронов» и «Образцовой меры плотности потока промежуточных нейтронов». Специалисты Курчатовского института и их коллеги из других ядерных исследовательских центров проводят здесь испытания аппаратуры для систем управления и защиты реакторов атомных станций и других ядерных установок, калибровочные испытания датчиков для АЭС, испытывают детекторы для внутриреакторных измерений



Рис. 7.2. Пульт управления первой в мире АЭС



Рис. 7.3. Первая в мире атомная подводная лодка
USS Nautilus (SSN-571), США

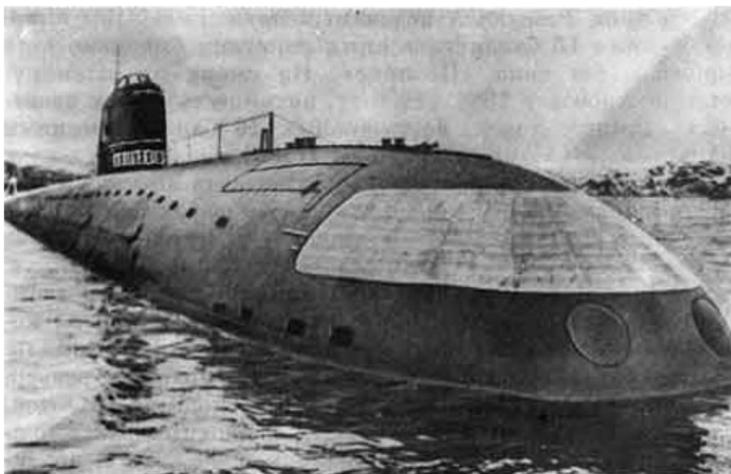


Рис. 7.4. Первая советская атомная подводная лодка «Ленинский комсомол»



Рис. 7.5. Первый атомный ледокол «Ленин»

Из приведенной хронологии следует, что в 1949 г. ядерные исследования в СССР вышли на мировой уровень и стали успешно конкурировать с США. В Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ, Москва) был пущен тяжеловодный исследовательский реактор (ТВР); тяжелая вода в нем используется для замедления нейтронов. Работа над его со-

зданием была проведена в рекордно короткие сроки (особенно по теперешним временам): в 1947 г. было начато проектирование реактора (главный конструктор – Б. М. Шолкович), в 1948 г. он был построен, а в апреле 1949 г. на реакторе был проведен первый критический эксперимент.

На этом реакторе А. И. Алиханов и его сотрудники провели важные для проектирования и сооружения других реакторов измерения ядерно-физических констант и накопили необходимый опыт эксплуатации. Под руководством А. И. Алиханова и В. В. Владимирского были разработаны и сооружены промышленные тяжеловодные реакторы для производства плутония, трития и других изотопов, опытные тяжеловодные реакторы в Югославии и КНР, тяжеловодный реактор с газовым охлаждением КС-150 для атомной электростанции А-1, вступившей в строй в 1972 г. в ЧССР.

В 1956 г. реактор ТВР ИТЭФ был реконструирован, достиг мощности 2,5 МВт и проработал до 1986 г.

К тому времени СССР занял лидирующие позиции в мире в области расчетов реакторов и стал одним из лидеров в реакторостроении. Была осознана важность научных исследований с нейтронами, поэтому по всей стране, почти в каждой из союзных республик, стали строиться исследовательские ядерные реакторы для получения интенсивных пучков нейтронов.

Наиболее важную роль в развитии нейтронных исследований в СССР сыграли следующие события: пуск 29 декабря 1959 г. исследовательского реактора ВВР-М (водо-водяной реактор модернизированный, в котором в качестве замедлителя нейтронов и для охлаждения используется обычная вода) в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ, Гатчина) мощностью 10 МВт. Вначале планировалось создание, как и в других местах, серийного 2-мегаваттного реактора ВВР-С, однако в ходе строительства проект был модернизирован, мощность доведена до 10 МВт, и реактор стал называться ВВР-М. В дальнейшем его мощность была доведена до 18 МВт (рис. 7.6).

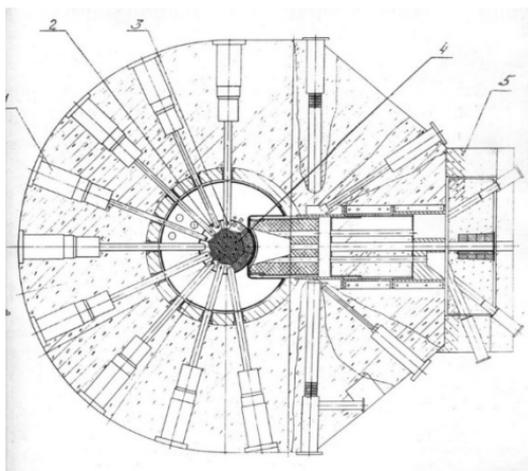
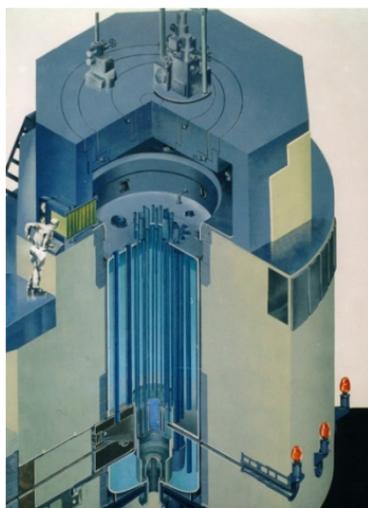


Рис. 7.6. Действовавший в ПИЯФ с 1959 по 2015 г. реактор ВВР-М мощностью 18 МВт (рис. А. С. Розина (Соломон Россин)) 31.12.2015 переведен в режим длительного останова (слева) и схема расположения горизонтальных каналов для выведения пучков нейтронов из активной зоны реактора для проведения исследований (справа)

23 июня 1960 г. состоялся пуск первого в мире импульсного реактора периодического действия ИБР-1 в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) мощностью 1 кВт и длительностью импульса 40 мкс (при этом мгновенная мощность в импульсе достигала 5 МВт). В дальнейшем была обоснована возможность повысить среднюю мощность реактора до 6 кВт, и с 1964 г. реактор работал на мощности от 2 до 6 кВт. При средней мощности в 3 кВт в момент вспышки цепной реакции реактор позволял получить поток нейтронов в максимуме импульса $1,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и мгновенную мощность 23 МВт. Для создания избыточной реактивности служил вращающийся между топливными стержнями диск, в который запрессован кусок урана-235. ИБР-1 был предназначен для исследований в области ядерной физики (измерение нейтронных сечений, параметров нейтронных резонансов, уровней возбуждения ядер и т. п.) с применением методов спектроскопии нейтронов, а также для изучения структуры и динамики твердых тел и жидкостей методами рассеяния нейтронов. ИБР-1 завершил работу в августе 1968 г.

10 июня 1969 г. был введен в работу усовершенствованный аналог ИБР-1 – ИБР-30 мощностью 30 кВт (с мощностью в импульсе 150 МВт).

14 ноября 1977 г. состоялся физический пуск, а в 1984 г. началась эксплуатация нового уникального пульсирующего реактора – ИБР-2 со средней

мощностью 2 МВт и с рекордной интенсивностью нейтронов в импульсе: его мощность в импульсе составляет 1 500 МВт (рис. 7.7). Импульсы тепловых нейтронов длительностью ~ 245 мкс испускаются с частотой 5 Гц, максимальный нейтронный поток в импульсе – 10^{16} см $^{-2}$ · с $^{-1}$. Этот реактор до сих пор является одним из лучших в мире импульсных источников нейтронов для исследования конденсированных сред.

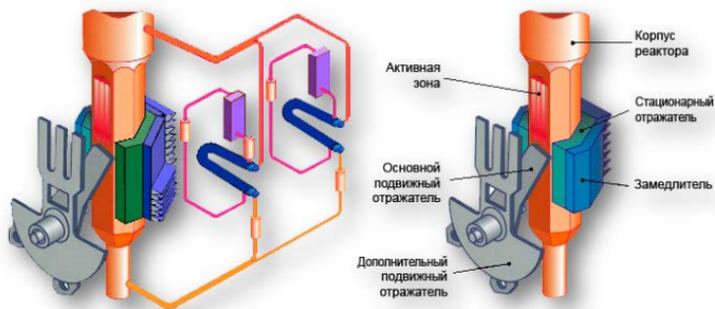


Рис. 7.7. Схема пульсирующего реактора ИБР-2 в Дубне. Вспышка цепной реакции с испусканием мощного импульса нейтронов периодически происходит при определенных положениях вращающихся подвижных отражателей

Пуск таких источников нейтронов сыграл решающую роль в том, что российские ученые довольно быстро заняли и до сих пор занимают передовые позиции во многих областях нейтронных исследований.

На реакторах ТВР, ВВР-М и ИБР были реализованы многие идеи, высказанные впервые нашими учеными. Например, в Дубне (последний эксперимент на реакторе ИБР-1) впервые были получены так называемые ультрахолодные нейтроны (УХН). Это такие нейтроны, которые можно хранить в обычном сосуде, например, из меди, бериллия или углерода. О возможности хранения УХН в сосуде и их использования для измерения времени жизни впервые догадался Я. Б. Зельдович (1959). Подробнее об этом см. в следующем разделе. Магнитные «зеркала», а также магнитные «бутылки» для хранения УХН разработал В. В. Владимирский (1960). Ф. Л. Шапиро предложил использовать УХН для поиска электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона (1962).

Самый интенсивный для своего времени источник УХН в мире был создан на ВВР-М, а пучок холодных поляризованных нейтронов, который был также самым интенсивным в мире, до сих пор остался непревзойденным. На тяжеловодном реакторе ТВР были получены первые в СССР поляризованные пучки нейтронов. Разработан уникальный метод ядерно-магнит-

ного резонанса (бета-ЯМР) на поляризованных бета-активных ядрах. Созданы новые методы исследования вещества при помощи поляризованных нейтронов (ИТЭФ, ОИЯИ, ПИЯФ). Были получены выдающиеся результаты по поиску и изучению нарушения фундаментальных симметрий в реакциях с нейтронами и при распаде самого нейтрона обнаружено существование слабого нуклон-нуклонного взаимодействия и, тем самым, доказана универсальность слабого взаимодействия (ИТЭФ, ПИЯФ). Получено рекордное ограничение на величину ЭДМ нейтрона (ПИЯФ). С рекордной точностью измерено время жизни нейтрона (ПИЯФ – ОИЯИ). Развита кристалл-дифракционная гамма- и нейтронная спектроскопия рекордного разрешения (ПИЯФ).

На мировой уровень вышла физика деления. Была обнаружена асимметрия вылета нейтронов относительно спина делящегося ядра (то есть относительно направления его вращения), которые сопровождают акт деления атомных ядер, а далее – еще несколько типов асимметрий вылета осколков деления (ИТЭФ, ПИЯФ).

7.2. Исследования с нейтронами

Нейтроны наряду с протонами являются теми элементарными частицами, из которых построены атомные ядра обычного вещества. Нейтроны являются естественным хронометром Вселенной, они живут около 900 с, распадаясь на протоны, электроны и антинейтрино. Их время жизни определяет распространенность легких элементов во Вселенной, которые образовались в первые минуты после Большого взрыва (так называемый первичный нуклеосинтез). Они также играют важную роль в процессах звездного нуклеосинтеза, который определяет происхождение тяжелых элементов во Вселенной и, в частности, на Земле. Нейтрон – это уникальная электрически нейтральная частица, участвующая во всех известных взаимодействиях: гравитационном, слабом, электромагнитном и сильном. Поэтому изучение его фундаментальных свойств дает ключ к пониманию как структуры элементарных частиц и механизма их взаимодействий, так и процессов, происходящих в масштабах Вселенной.

К настоящему времени известны следующие фундаментальные свойства свободного нейтрона (Particle Data Group – 2018, см. табл. 7.1).

Фундаментальные свойства нейтрона

Наименование	Показатель
Спин	1/2
Заряд	$q_n = (-0,4 \pm 1,1) \cdot 10^{-21} e$
Масса (в МэВ и а. е. м.)	$m_n = 939,56533 \pm 0,00004 \text{ МэВ} =$ $= 1,00866491578 \pm 0,00000000055 \text{ а. е. м.}$
Разность масс нейтрона и протона (в МэВ и а. е. м.)	$m_n - m_p = 1,2933318 \pm 0,0000005 \text{ МэВ} =$ $= 0,0013884489 \pm 0,0000000006 \text{ а. е. м.}$
Время жизни	$\tau_n = 879,6 \pm 0,7 \text{ с (14,66 мин.)}$
Магнитный момент	$\mu_n = -1,9130427 \pm 0,0000005 \mu_N$
ЭДМ	$d_n < 0,3 \cdot 10^{-25} e \cdot \text{см}$ (с достоверностью 90 %)
Электрическая поляризуемость	$\alpha_n = 0,98_{-0,23}^{+0,19} \cdot 10^{-3} \text{ Фм}^3$

Эти свойства нейтрона позволяют использовать его, с одной стороны, как объект, который изучается, и, с другой стороны, как инструмент, при помощи которого ведутся исследования.

7.2.1. Исследование фундаментальных свойств нейтрона

Исследование свойств нейтрона дает возможность наиболее надежно и точно определить фундаментальные параметры объединенного электро-слабого взаимодействия и тем самым либо подтвердить, либо опровергнуть современную Стандартную модель элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий.

Поиск и измерение ЭДМ является одним из наиболее прецизионных и важных экспериментов в физике. Многие из предлагавшихся теорий *CP*-нарушения (то есть нарушения симметрии между правым и левым, а также миром и антимиром) уже отвергнуты полученной к настоящему времени величиной предела на ЭДМ нейтрона $< 0,3 \cdot 10^{-25} e \cdot \text{см}$.

Понижение экспериментального предела в 10–20 раз, что не кажется непреодолимым, является исключительно важным для проверки новых объединяющих все взаимодействия теорий (так называемые теории *великого объединения* и *суперсимметричные теории*).

Кроме того, понижение экспериментального предела на величину ЭДМ нейтрона исключительно важно с точки зрения понимания такого явления космического масштаба, как барионная асимметрия Вселенной. До сих пор это одна из самых захватывающих загадок, почему во Вселенной нет антивещества, то есть есть *барионы* – протоны и нейтроны, а *антибарионы*

отсутствуют. Это означает, что когда-то (около 14 млрд лет назад), на ранней стадии образования Вселенной, барионов было чуть больше, чем антибарионов. После аннигиляции частиц и античастиц приблизительно через 10^{-6} с после Большого взрыва, когда температура Вселенной стала меньше 1 ГэВ (то есть меньше массы нуклона, и фотоны при столкновениях друг с другом потеряли возможность образовывать пары «частица – античастица»), остались не только одни фотоны, но и барионы. Этот остаток и есть наш мир, в том числе и мы с вами. Причем число оставшихся барионов гораздо (на 15 порядков) больше, чем предсказывает Стандартная модель, и это пока единственное явление, ей противоречащее. Кроме того, Стандартная модель предсказывает величину ЭДМ нейтрона на уровне $10^{-33} e \cdot \text{см}$, который недоступен наблюдению современными средствами. Поэтому, если ЭДМ нейтрона окажется на указанном выше уровне (10^{-26} – $10^{-28} e \cdot \text{см}$), это будет свидетельством существования новых взаимодействий (новых тяжелых частиц) и новой физики, выходящей за рамки Стандартной модели. Для тех же целей поиска новых частиц, но в прямых столкновениях протонов огромных энергий построен БАК в ЦЕРН.

7.2.2. Нейтроны в физике ядра и элементарных частиц

Взаимодействие неполяризованных и поляризованных нейтронов разных энергий с ядрами позволяет их использовать в физике ядра и элементарных частиц. Изучение эффектов нарушения пространственной четности и инвариантности относительно обращения времени в различных процессах с нейтронами (от нейтронной оптики до деления ядер нейтронами) – далеко не полный перечень наиболее актуальных сейчас направлений исследований.

7.2.3. Нейтроны в физике конденсированного состояния вещества

Тот факт, что реакторные нейтроны тепловых энергий имеют длины волн, сравнимые с межатомными расстояниями в веществе, делает их незаменимым инструментом для исследования конденсированных сред. Взаимодействие нейтронов с атомами является сравнительно слабым, что позволяет нейтронам достаточно глубоко проникать в вещество – в этом их существенное преимущество по сравнению с рентгеновскими и гамма-лучами, а также пучками заряженных частиц.

Некоторые свойства тепловых нейтронов (с длиной волны 1 \AA), важные для проведения таких исследований, приведены ниже (табл. 7.2).

Свойства тепловых нейтронов

Наименование	Показатель
Длина волны	$\lambda_n = 1 \text{ \AA}$ (тепловые нейтроны)
Скорость	$v = p/m_n = 2\pi\hbar/\lambda_n m_n = c\lambda_{cp}/\lambda_n \approx 4 \text{ км/с}$
Энергия	$E = m_n v^2/2 = 0,08 \text{ эВ}$
Магнитный момент	$\mu_n = -1,9130427 \pm 0,0000005 \mu_N$
Ядерные амплитуды рассеяния	непосредственно не зависят от Z

Из-за наличия массы нейтроны при том же импульсе (следовательно, при той же длине волны) обладают значительно меньшей энергией, чем рентгеновские и гамма-лучи, и эта энергия оказывается сравнимой с энергией тепловых колебаний атомов и молекул в веществе, что дает возможность изучать не только усредненную статическую атомную структуру вещества, но и динамические процессы, в нем происходящие.

Наличие магнитного момента у нейтронов дает уникальную возможность использовать их для изучения магнитной структуры (которая не всегда совпадает с атомной структурой) и магнитных возбуждений вещества, что очень важно для понимания свойств и природы магнетизма материалов.

Рассеяние нейтронов атомами обусловлено в основном ядерными силами, следовательно, интенсивность рассеянных нейтронов никак не связана с атомным номером (в отличие от рентгеновских и гамма-лучей). Поэтому «освещение» материалов нейтронами позволяет различать положения атомов легких (водород, кислород и др.) элементов, идентификация которых почти невозможна с использованием рентгеновских и гамма-лучей. По этой причине нейтроны успешно применяются при изучении биологических объектов, в материаловедении, медицине и других областях.

Кроме того, различие во взаимодействии нейтронов с разными изотопами позволяет не только отличать в материале элементы с близкими атомными номерами, но и исследовать их изотопный состав.

7.2.4. Нейтроны и космология

Еще раз отметим, что нейтрон является естественным хронометром Вселенной, его время жизни играет существенную роль в первичном нуклеосинтезе легких элементов (водорода, гелия и лития), сформировавшихся в первые несколько минут после Большого взрыва. Величина времени

жизни нейтрона существенно влияет на относительную распространенность этих элементов в природе.

Нейтроны играют важную роль также в процессах вторичного звездного нуклеосинтеза, то есть в термоядерных реакциях синтеза, которые идут в недрах звезд и которые определяют распространенность тяжелых элементов во Вселенной.

7.3. История открытия нейтрона и его фундаментальные характеристики

Открытие нейтрона явилось следствием опытов по расщеплению легких ядер альфа-частицами, начатых Резерфордом в 1919 г. Он облучал азот ^{14}N альфа-частицами и в результате получил протоны с большой длиной пробега. До 1931 г. ускорителей, пригодных для ускорения частиц до энергий, достаточных для расщепления ядер, не существовало, поэтому реакция (α, p) , осуществляемая при помощи альфа-частиц, испускаемых естественными радиоактивными элементами, была единственной известной ядерной реакцией. За период с 1921 по 1924 г. было установлено, что при бомбардировке альфа-частицами большинство легких элементов вплоть до калия (заряд ядра Z должен быть не очень велик, чтобы альфа-частица с энергией в несколько МэВ могла преодолеть кулоновское отталкивание), за исключением углерода и кислорода, испускают протоны. Кроме того, в этих реакциях постоянно возникает элемент, следующий по порядку в периодической системе. Все это вполне вписывалось в рамки представления о веществе как о состоящем из протонов и электронов.

7.3.1. Бериллиевые лучи

В 1930 г. Вальтер Боте и Ганс Беккер обнаружили (рис. 7.8), что при бомбардировке ядер бериллия альфа-частицами вместо протонов возникает проникающее излучение, которое очень слабо поглощается свинцом, но воздействует на счетчик Гейгера – Мюллера.

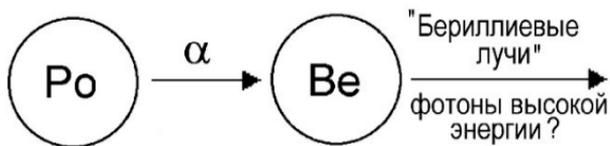


Рис. 7.8. В результате бомбардировки ядер бериллия альфа-частицами возникают таинственные бериллиевые лучи

Они заявили, что новое излучение имеет проникающую способность такую же, как очень жесткие гамма-лучи. Поэтому его приняли сначала за жесткое гамма-излучение (действительно, позднее, в 1935 г., было показано, что атомное ядро при столкновении с альфа-частицей может переходить в возбужденное состояние и возвращаться в первоначальное путем излучения гамма-кванта).

В 1932 г. Ирен и Фредерик Жолио Кюри показали, что бериллиевые лучи обладают удивительным свойством выбивать быстрые протоны из водородсодержащих веществ, таких как, например, парафин. Однако они объясняли это тем, что «электромагнитное излучение очень высокой частоты способно освобождать в водородсодержащих веществах протоны и придавать им высокие скорости» (рис. 7.9).

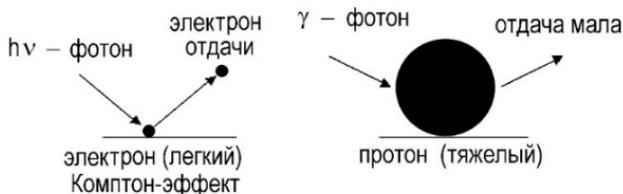


Рис 7.9. Бериллиевые лучи могут выбивать быстрые протоны.
 Может быть, это гамма-кванты очень большой энергии?

Решающий шаг сделал Дж. Чедвик, предположивший и доказавший простыми экспериментами (см. рис. 7.9, 7.10), что это загадочное излучение есть не что иное, как поток нейтральных частиц с массой, близкой к массе протона. В своей статье он писал: «...Все трудности исчезают, если предположить, что излучение состоит из частиц с массой 1 и зарядом 0, то есть из нейтронов. Можно предположить, что в результате захвата альфа-частицы ядром ${}^9\text{Be}$ образуется ядро ${}^{12}\text{C}$ и испускается нейтрон».

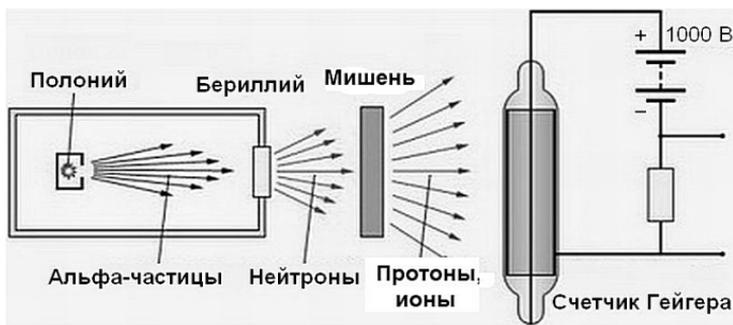


Рис. 7.10. Схема опыта Дж. Чедвика

Ход его рассуждений стоит проследить более детально. Ирен и Фредерик Жолио Кюри при помощи ионизационной камеры установили, что бериллиевые лучи выбивают из парафина протоны, пробег которых в воздухе достигает 26 см, что соответствует энергии в 4,3 МэВ. Образование протонов было доказано непосредственно путем наблюдения их треков в камере Вильсона. Если считать бериллиевые лучи гамма-квантами, то можно оценить энергию, которую они должны иметь, чтобы сообщить протонам (из водорода) такую энергию.

Для этой цели нам понадобится формула Дебая – Комптона, описывающая смещение частоты при рассеянии фотона на заряженной частице.

Явление изменения длины волны рентгеновских лучей при рассеянии пучка в тонком слое вещества было известно за несколько лет до работы А. Комптона, который опубликовал в 1923 г. результаты тщательно выполненных экспериментов, подтвердивших существование этого эффекта, и одновременно предложил его объяснение. (Вскоре независимое объяснение было дано П. Дебаем, почему явление иногда называют эффектом Комптона – Дебая.) За свое открытие А. Комптон был удостоен Нобелевской премии по физике 1927 г.

Теория, дающая выражение для интенсивности рассеянного электронами излучения, была впервые разработана на основе дираковской релятивистской квантовой механики О. Клейном и Е. Нишиной в 1929 г., и вновь было найдено, что теория хорошо описывает эксперимент.

7.3.2. Формула Дебая – Комптона

Эту формулу, связывающую смещение частоты фотона (то есть разность конечной и начальной энергий фотона, деленной на постоянную Планка) и угол рассеяния фотона, мы выведем.

Рассмотрим процесс рассеяния гамма-квантов с энергией ω и импульсом k на покоящемся протоне (или на какой-либо другой заряженной частице с массой m), схематически изображенный на рис. 7.11. Эта схема называется диаграммой Фейнмана, или фейнмановским графиком, в честь Ричарда Фейнмана, который изобрел такие графики, позволяющие очень эффективно рассчитывать различные процессы взаимодействия частиц.

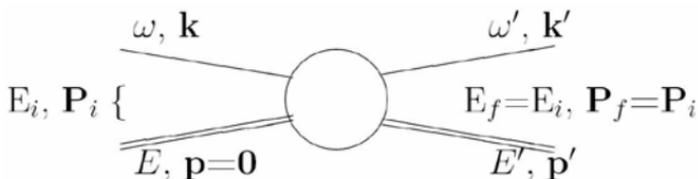


Рис. 7.11. Фейнмановский график, описывающий комптоновское рассеяние фотона (одиночная линия) на протоне (двойная линия)

В чем состоит процесс рассеяния? Вначале у нас есть начальное состояние – фотон с энергией ω и импульсом \mathbf{k} и покоящееся ядро с энергией $E = mc^2$ и импульсом $\mathbf{p} = 0$. В результате столкновения фотона с ядром фотон улетает уже с энергией ω' и импульсом \mathbf{k}' , а ядро приобретает импульс \mathbf{p}' и кинетическую энергию, так что полная энергия становится равной E' . Мы должны определить это конечное состояние.

Напишем законы сохранения энергии и импульса для этого случая:

$$\omega + mc^2 = \omega' + E',$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}' + \mathbf{p}'.$$

Здесь ω , \mathbf{k} и ω' , \mathbf{k}' – начальные и конечные энергии и импульсы фотона; E , \mathbf{p} и E' , \mathbf{p}' – начальные и конечные энергии и импульсы протона. Мы учли, что начальный импульс протона равен нулю (рассеяние на *покоящемся* протоне). Нужно помнить, что импульс – это вектор, который имеет три компоненты (k_x, k_y, k_z и p_x, p_y, p_z – проекции векторов k и p на оси x, y, z). Кроме того, еще необходимо знать связь между энергией и импульсом частиц (законы дисперсии). Они имеют вид

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

для протона (напомним, что $p^2 = \mathbf{p}^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2$) и

$$\omega = ck$$

для фотона.

Эти уравнения полностью определяют поставленную задачу. Таким образом, мы имеем четыре уравнения, описывающие сохранение энергии (одно уравнение) и вектора импульса (три уравнения). Плюс четыре уравнения дисперсии (два для начального и два для конечного состояния). Таким образом, имеются восемь уравнений для восьми неизвестных – конечных энергий и импульсов фотона и ядра. На первый взгляд кажется, что решить такую систему уравнений весьма затруднительно.

Однако давайте попробуем. Для упрощения вычислений все эти уравнения удобно переписать в четырехмерной форме. Первые два при этом объединяются в закон сохранения 4-вектора импульса:

$$p_{\mu} + k_{\mu} = p'_{\mu} + k'_{\mu},$$

а законы дисперсии принимают вид

$$p_{\mu}^2 = p_0^2 - \mathbf{p}^2 = m^2 c^2,$$

$$k_{\mu}^2 = k_0^2 - \mathbf{k}^2 = 0,$$

где нулевые (временные) компоненты 4-векторов импульсов p_{μ} и k_{μ} есть $p_0 = E/c$, $k_0 = \omega/c$ соответственно. Здесь использованы стандартные обозначения: греческими индексами пронумерованы компоненты 4-векторов (латинскими будем нумеровать компоненты векторов в обычном, трехмерном, пространстве (то есть $i = 1, 2, 3$ нумерует оси x, y, z). По повторяющимся индексам производится суммирование следующим образом:

$$a_{\mu} b_{\mu} = a_0 b_0 - a_i b_i = a_0 b_0 - a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3.$$

Соответственно скалярное произведение 4-векторов определяется как

$$ab \equiv a_{\mu} b_{\mu} = a_0 b_0 - \mathbf{a} \mathbf{b} = a_0 b_0 - a_i b_i.$$

Из закона сохранения 4-импульса следует:

$$p_{\mu} - p'_{\mu} = k'_{\mu} - k_{\mu}.$$

Возводя обе части уравнения в квадрат и используя уравнения дисперсии (то есть то, что квадрат 4-импульса ядра равен $m^2 c^2$, а фотона – нулю), получим:

$$m^2 c^2 - p_{\mu} p'_{\mu} = -k'_{\mu} k_{\mu},$$

что в лабораторной системе отсчета (то есть в системе, где ядро покоится и $p_{\mu} \equiv (p_0, \mathbf{p}) = (E/c, 0)$) приводит к результату:

$$m^2 c^2 - \frac{EE'}{c^2} = -\left(\frac{\omega\omega'}{c^2} - kk' \cos \theta \right) = -kk'(1 - \cos \theta).$$

Здесь θ – угол между направлениями \mathbf{k} и \mathbf{k}' (угол рассеяния гамма-кванта).

Подставляя в левую часть $E = mc^2$ и $E' = \omega - \omega' + mc^2$ (уменьшение энергии фотона $\omega - \omega'$ пошло на увеличение энергии частицы) получим:

$$k - k' = -\frac{kk'}{mc}(1 - \cos \theta).$$

Учитывая связь импульса с длиной волны (соотношение де Бройля) $k = 2\pi\hbar/\lambda$, получим известную формулу Дебая – Комптона:

$$\lambda' - \lambda = -\frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos \theta),$$

где λ, λ' – длины волн падающего и рассеянного кванта, а θ – угол рассеяния. Она описывает «покраснение» фотона в результате рассеяния на электроне. Заметим, что эта формула (и, соответственно, сам эффект комптоновского смещения частоты) является существенно квантовой. В классическом пределе при $\hbar \rightarrow 0$ изменение длины волны фотона при рассеянии исчезает, что и имеет место в классической электродинамике при чисто волновой трактовке этого процесса. Мы же с самого начала предположили, что фотон (гамма-квант) – это частица, и получили совершенно правильный квантовый результат. Следует также обратить внимание, что у нас опять появилась комптоновская длина волны частицы (ядра), на которой происходит рассеяние:

$$\lambda_c = \frac{\hbar}{mc}.$$

Именно она определяет смещение длины волны при рассеянии фотона.

7.3.3. Являются ли бериллиевые лучи гамма-квантами

При лобовом столкновении фотон «отскакивает» назад, то есть $\theta = 180^\circ$. В этом случае передача импульса частице (протону, например) и, соответственно, его кинетическая энергия после столкновения (энергия отдачи) $E_{\text{rec}} = E - mc^2$ максимальна. Эта энергия равна изменению энергии («покраснению») фотона:

$$E_{\text{rec}} = \omega - \omega' = c\Delta k,$$

где $\Delta k = k - k'$. Величину Δk (убыль импульса фотона) легко выразить через его начальный импульс, пользуясь выражением для изменения импульса фотона, подставив в него $k' = k - \Delta k$ при $\theta = 180^\circ$:

$$\Delta k = \frac{2k^2 - 2k\Delta k}{mc},$$

откуда следует:

$$\Delta k = \frac{2k^2}{mc} \frac{1}{1 + \frac{2k}{mc}} = \frac{k}{1 + \frac{mc}{2k}}.$$

Умножая на скорость света, получим энергию отдачи

$$E_{\text{rec}} = \frac{\omega}{1 + \frac{mc^2}{2\omega}}.$$

В нерелятивистском случае ($\omega \ll mc^2$, или $mc^2/\omega \gg 1$) единицей в знаменателе можно пренебречь, в результате будем иметь

$$E_{\text{rec}} \approx \frac{2\omega^2}{mc^2}.$$

Отсюда получим энергию фотона, необходимую для того, чтобы сообщить протону заданную энергию E_{rec} ,

$$\omega \approx \sqrt{\frac{mc^2 E_{\text{rec}}}{2}}.$$

Если сюда подставить измеренную $E_{\text{rec}} = 4,3$ МэВ и энергию покоя протона $mc^2 = 938$ МэВ ≈ 1 ГэВ, то получается $\omega = 47$ МэВ. Уже тогда из измеренных значений энергий альфа- и бета-частиц, а также гамма-квантов, испускаемых ядрами, можно было сделать вывод, что ядро не может иметь возбужденных уровней с такой энергией, и, следовательно, в таком предположении нарушается энергетический баланс. Кроме того, было установлено, что число протонов отдачи в несколько тысяч раз больше числа, которое получается из хорошо подтвержденной на опыте формулы Клейна – Нишины, определяющей вероятность комптоновского рассеяния.

Чедвик также установил, что, кроме протонов, бериллиевые лучи способны выбивать из вещества и другие легкие ядра вплоть до азота: Li, Be, B, C, N. Энергии этих ядер можно было определить либо по длине пробега, либо по величине импульса в ионизационной камере. Оказалось, что ядра отдачи азота, например, имеют энергию 1,2 МэВ. Для образования таких ядер за счет эффекта Комптона гамма-кванты уже должны были бы иметь другую, еще большую энергию ≈ 70 МэВ.

7.3.4. Масса нейтрона

Далее Чедвик предположил, что обнаруженное Боте и Беккером излучение состоит не из гамма-квантов, а из частиц с конечной массой покоя. Эта гипотеза привела к прекрасному согласию со всей совокупностью результатов экспериментов и позволила определить эту массу.

Опять рассматривая только лобовые соударения, для столкновения массивных частиц (нейтронов с массой m) с ядром (массы M) можно написать законы сохранения энергии и импульса:

$$m v^2 = m v'^2 + M V^2,$$

$$m v = m v' + M V.$$

Здесь v , v' – скорости нейтрона до и после столкновения соответственно, V – скорость ядра отдачи. Исключая v' , получим:

$$V = \frac{2m}{M+m}v.$$

Для определения массы нейтрона нужно измерить максимальную энергию отдачи двух различных ядер, $E_1 = M_1V_1^2/2$ и $E_2 = M_2V_2^2/2$, и знать их массы M_1, M_2 :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{M_1+m}{M_2+m}.$$

Подставляя сюда полученные из опыта скорости ядер отдачи водорода и азота ($3,3 \cdot 10^9$ и $4,7 \cdot 10^8$ см/с соответственно), Чедвик получил $m = 1,15$ а. е. м. с точностью 10 %. Если теперь найти эту массу по другой паре ядер, то получится тот же самый результат.

В этой же работе был предложен другой способ измерения массы нейтрона, основанный на балансе энергий и масс объектов, участвующих в реакции, в которой образуется нейтрон. Впоследствии все работы по уточнению массы нейтрона были основаны именно на этом принципе.

7.3.5. Заряд нейтрона

Наблюдая прохождение нейтронов в газе камеры Вильсона, Филлип Ди в 1932 г. установил, что нейтрон создает не более одной пары ионов на пути в 3 м, что соответствует заряду по крайней мере в 1 000 раз меньшему, чем у протона. Поэтому предположили, что заряд нейтрона e_n равен нулю. Открытие нейтральной частицы с самого начала воспринималось физиками как событие первостепенной важности, поскольку разрушало представление о том, что заряд является неотъемлемым свойством вещества (протон, электрон).

В настоящее время интерес к наличию электрического заряда у нейтрона связан с такими фундаментальными проблемами физики, как, например, существование замкнутых суперструн – протяженных 10- или 26-мерных объектов. Из них может быть построен окружающий мир, в котором известные нам элементарные частицы в принципе перестают быть элементарными и точечными.

В 1989 г. была достигнута следующая точность прямого измерения заряда нейтрона:

$$e_n = (-0,4 \pm 1,1) \cdot 10^{-21} e,$$

которая до сих пор еще не превзойдена.

7.3.6. Магнитный момент нейтрона

Как уже упоминалось, в начале 30-х гг. трудно было ожидать, что нейтральная частица может обладать магнитным моментом (или вообще какими-либо электрическими свойствами, тем более если она элементарна, то есть бесструктурна). Однако измерения магнитных моментов ядер сразу в нескольких группах привели к гипотезе о наличии у нейтрона магнитного момента.

Прямое доказательство существования магнитного момента нейтрона путем его непосредственного измерения было получено лишь в 1940 г. в опытах Альвареса и Блоха, которые дали величину $\mu_n = (-1,93 \pm 0,030)\mu_N$.

Что же такое ядерный магнетон? Из уравнения Дирака (написанного им в 1928 г.) следует, что любая элементарная частица с зарядом e , спином $1/2$ и массой m обладает магнитным моментом

$$\mu_D = \frac{e\hbar}{2mc} = \frac{e\lambda_c}{2}.$$

Этот дираковский магнитный момент для электрона совпадает с магнетоном Бора μ_B , хорошо известным в физике атома, а для протона называется ядерным магнетоном,

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p c} = \frac{e\lambda_{pc}}{2}.$$

Заметим, что опять возникла знакомая нам комптоновская длина волны частицы. Таким образом, в теории Дирака, если измерять магнитные моменты в ядерных магнетонах, магнитный момент протона должен быть $\mu_p = 1$, а нейтрона – $\mu_n = 0$. Однако из эксперимента следует, что

$$\mu_n = -1,9\mu_N, \quad \mu_p = 2,8\mu_N.$$

Отличие магнитного момента от дираковского называется аномальным магнитным моментом. Таким образом, магнитный момент нейтрона целиком аномален. Кроме того, нетрудно заметить, что аномальные магнитные моменты протона и нейтрона приблизительно равны, но противоположны по знаку:

$$\mu'_n = -1,9\mu_N, \quad \mu'_p = +1,8\mu_N.$$

Это говорит о достаточно сложной структуре нуклонов (в этом смысле они не элементарны). С точки зрения мезонной теории ядерных сил нуклоны непрерывно испускают и поглощают π -мезоны (рис. 7.12), то есть они окружены мезонным облаком.



Рис. 7.12. Графики возможных процессов излучения и поглощения виртуального пиона нуклоном

Поскольку протон и нейтрон (в силу закона сохранения заряда) испускают π -мезоны разных знаков, то, в принципе, можно понять разный знак и приблизительное равенство аномальных моментов по величине. Размер этого облака (следовательно и нуклона) можно оценить из простых соображений, пользуясь соотношением неопределенностей Гейзенберга, которое является одним из ключевых в квантовой механике. Оно гласит: чтобы измерить энергию частицы с точностью лучше, чем ΔE , время измерения Δt должно быть $\Delta t \geq \Delta E/\hbar$, то есть в заданный момент времени энергия не определена (неопределенность бесконечна), а для того чтобы точно определить энергию, необходимо бесконечное время, произведение же неопределенностей энергии и времени подчиняется соотношению Гейзенберга: $\Delta t \Delta E \geq \hbar$.

Таким образом, самопроизвольное рождение π -мезона нарушает закон сохранения энергии по крайней мере на величину его энергии покоя $m_\pi c^2$. Из соотношения неопределенностей следует, что такое нарушение может произойти лишь на время

$$\Delta t \leq \hbar/m_\pi c^2,$$

а за это время π -мезон может улететь от нуклона на расстояние, не большее $c\Delta t$, где c – скорость света. Таким образом, размер r_N нуклона, определяемый размером мезонного облака, есть

$$r_N \approx c\Delta t = \frac{\hbar}{m_\pi c} = \tilde{\lambda}_{\pi c}.$$

Заметим, что этот результат получен как следствие теории относительности (связь массы и энергии) и квантовой механики (соотношение неопределенностей). Он имеет гораздо более общий и глубокий смысл, а именно: в релятивистской квантовой теории число частиц, в принципе, не сохраняется, одни частицы могут исчезать, а другие – появляться. Поэтому такая теория должна естественным образом описывать рождение и уничтожение частиц, в частности процессы распада элементарных частиц.

В настоящее время можно утверждать, что и протоны, и нейтроны (в том числе и π -мезоны) состоят из точечных (с размерами $< 10^{-16}$ см) частиц. Их структура, если она и есть, пока недоступна экспериментальному

наблюдению. Эти частицы можно отождествить с двумя типами кварков, u и d (up и $down$), с дробными зарядами

$$e_u = 2/3e, \quad e_d = -1/3e$$

и спинами $1/2$. Если считать, что они бесструктурны, то есть обладают дираковскими магнитными моментами, которые пропорциональны зарядам, то, зная кварковый состав протона и нейтрона (рис. 7.13), нетрудно вычислить отношение их магнитных моментов.

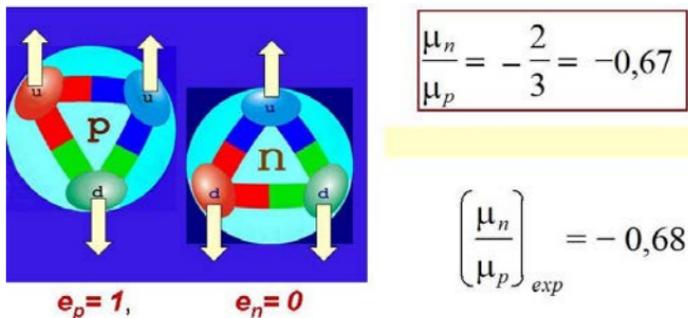


Рис. 7.13. Кварковый состав нуклонов. Сравнение расчета отношения магнитных моментов с экспериментом

Простой расчет в предположении, что спины (магнитные моменты) одинаковых кварков параллельны, приводит к результату:

$$\frac{\mu_n}{\mu_p} = -\frac{2}{3} = -0,67.$$

Используя экспериментально измеренные величины магнитных моментов нейтрона и протона для того же отношения, будем иметь

$$\left(\frac{\mu_n}{\mu_p} \right)_{exp} = -\frac{1,913}{2,793} = -0,68.$$

Таким образом, простые гипотеза о кварковом составе нуклонов и рассуждения привели к результату, прекрасно согласующемуся с экспериментальными данными. Из этого примера также видно, как электромагнитные свойства нейтрона могут быть связаны с гораздо более глубоким строением элементарных частиц.

Наши рассуждения можно продолжить. Например, мы подтвердили наше предположение, что спины одинаковых кварков в нуклоне параллельны, но оно противоречит принципу запрета Паули, который гласит, что две тождественные частицы с полуцелыми спинами не могут находиться в

одинаковых состояниях (то есть в состояниях с одинаковыми квантовыми числами, в данном случае с одинаковыми проекциями спина). Чтобы устранить противоречие, нужно, например, ввести новое квантовое число. В современной теории это так называемый цвет кварка.

7.3.7. Распад и время жизни нейтрона

В 1934 г. Чедвик и Гольдхабер открыли фоторасщепление дейтона (ядра атома дейтерия, состоящего из протона и нейтрона) и существенно уточнили величину массы нейтрона. Она оказалась больше суммы масс протона и электрона, что окончательно разрушило представление о нейтроне как о некотором компактном связанном состоянии протона и электрона. Кроме того, на основе этого превышения Фредериком Жолио-Кюри в 1934 г. было высказано предположение о радиоактивности нейтрона, которая была открыта лишь в 1948–1950 гг. независимо А. Снеллом и Л. Миллером (Ок-Ридж, США), Дж. Робсоном (Чок-Ривер, Канада) и П. Е. Спиваком (Институт атомной энергии, Москва, СССР).

По существу, П. Е. Спиваку и его сотрудникам (А. И. Сосновскому, Ю. А. Прокофьеву и др.) удалось еще в 1949 г. впервые наблюдать само явление распада нейтрона, и лишь условия секретности, в которых велись тогда все работы по ядерной физике, привели к тому, что опубликованы эти результаты были лишь на конференции по мирному использованию атомной энергии в Женеве в 1955 г., и потому приоритет открытия этого фундаментального процесса приписывают обычно Снеллу и Робсону.

Из таблицы 7.3 видно, что рекордный по точности результат измерения времени жизни, полученный группой Спивака в 1958 г., был превзойден лишь через 10 лет датской группой Кристенсена.

Однако картина постепенного улучшения точности измерений при сохранении согласия между отдельными результатами омрачена здесь очевидным противоречием между данными этих двух наиболее точных измерений. При указанных авторами погрешностях измерения $\pm 3\%$ и $\pm 1,5\%$ соответственно разница в результатах достигает 10 %.

Результаты измерений периода полураспада нейтрона

Год	Лаборатория	$T_{1/2}$, мин.
1948	Ок-Ридж (США)	15–30
1950	Чок-Ривер (Канада)	9–18
	Ок-Ридж (США)	10–30
	Чок-Ривер (Канада)	9–25
	ИАЭ (СССР)	8–15
1951	Чок-Ривер (Канада)	$12,8 \pm 2,5$
1955	ИАЭ (СССР)	$12,0 \pm 1,5$
1958		$11,7 \pm 0,3$
1959	Аргонн (США)	$12,7 \pm 1,9$
1967	Ризо (Дания)	$10,78 \pm 0,16$
1970		$10,61 \pm 0,16$

Такая же драматическая ситуация с временем жизни нейтрона возникла опять сравнительно недавно. Современное значение времени жизни нейтрона $\tau_n = 878,5 \pm 0,8$ с, полученное из экспериментов с УХН группой А. П. Сереброва в 2004 г. (ПИЯФ), оказалось почти на 7 с (при точности ~ 1 с) меньше значения $885,4 \pm 0,95$ с, полученного в 2000 г. (также с УХН) группой В. И. Морозова (Курчатовский институт, Москва). Сейчас уже доказано, что последнее измерение группы А. П. Сереброва является правильным, оно подтверждено другими измерениями, а также обработкой более ранних экспериментов с учетом новых знаний, полученных за последнее время. После опубликования последних работ группами ученых ПИЯФ и Лос-Аламосской национальной лаборатории (США), по измерению времени жизни нейтрона при хранении в магнитных ловушках новая среднемировая величина времени жизни стала равна $\tau_n = 879,4 \pm 0,6$ с (справочник Particle Data Group (PDG) за 2018 г.). Заметим, что в справочнике PDG-2010 приведено еще старое значение $\tau_n = 885,7 \pm 0,8$ с. Подробнее об этих измерениях см. в части 8.

Сейчас хорошо известно, что нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино, причем распад этот обусловлен слабым взаимодействием нейтрона. Поэтому изучение угловых корреляций при бета-распаде нейтрона (например, измерение разницы числа электронов, вылетевших по и против направления спина нейтрона) позволяет получать информацию о величине и структуре слабых взаимодействий, нарушении этими взаимодействиями фундаментальных симметрий, таких как инвариантность законов природы относительно пространственной инверсии (или отражения

в зеркале), обращения времени, а также замены частиц на античастицы. Вместе с точным измерением времени жизни нейтрона эти данные дают информацию о присутствии тяжелых кварков в нейтроне и позволяют наиболее точно определить величину их примеси. Уточнение этих данных является исключительно важным для подтверждения (или опровержения) Стандартной модели элементарных частиц и их взаимодействий.

7.3.8. Электрический дипольный момент нейтрона

Поиск ЭДМ нейтрона, как уже отмечалось, является одной из самых важных задач современной физики. Проблема существования ЭДМ нейтрона тесно связана с фундаментальными проблемами нарушения симметрии нашего мира относительно операции обращения времени T , а также CP -симметрии (инвариантности относительно зеркального отражения с одновременной заменой частиц на античастицы). Природа нарушения CP -инвариантности, обнаруженной в 1964 г. в распадах нейтральных K -мезонов, остается загадкой в течение уже более полувека. И до недавнего времени это был единственный известный случай CP -нарушения (и также нарушения симметрии относительно обращения времени T).

Летом 2004 г. две большие международные коллаборации, Belle и BaBar, работающие в Японии и США, сообщили о наблюдении CP -нарушения в распадах нейтральных B -мезонов, содержащих тяжелые кварки. Косвенным свидетельством CP -нарушения является также барионная асимметрия Вселенной.

Наличие ЭДМ у элементарной частицы также нарушает эти симметрии. Различные теории нарушения CP приводят к очень широкому спектру предсказываемых значений для ЭДМ нейтрона. Поэтому получение новых экспериментальных ограничений на эту величину приводит к исключению ряда теорий и позволяет получать новую информацию о механизме CP -нарушения и, тем самым, о свойствах взаимодействий элементарных частиц.

Сейчас наиболее точным методом измерения ЭДМ нейтрона является магниторезонансный метод с использованием УХН, развиваемый сейчас группой ученых ПИЯФ и в Институте Лауэ – Ланжевена (ИЛЛ, Гренобль, Франция) широкой международной коллаборацией, лидерами которой являются ученые из Резерфордской лаборатории и университета Сассекса (Великобритания).

Последний лучший результат, полученный этой коллаборацией в 2006 г. ($d_n \leq 3 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$), не намного лучше результата 20-летней давности ($d_n \leq 9,7 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$), полученного в ПИЯФ в 1989 г. Тем не менее это одна из самых высоких достигнутых к настоящему времени точностей. Если нейтрон представить в виде шара радиусом $R \sim 10^{-13} \text{ см}$, то $d/R \sim 3 \cdot 10^{-13}$. Такая доля от радиуса Земли составляет $\sim 2 \text{ мкм}$ (рис. 7.14). В настоящее

время к поиску ЭДМ нейтрона присоединилась коллаборация, работающая на недавно запущенном источнике УХН в институте Пауля – Шеррера (Швейцария), которая незначительно (приблизительно на 10 %) улучшила указанный выше результат.

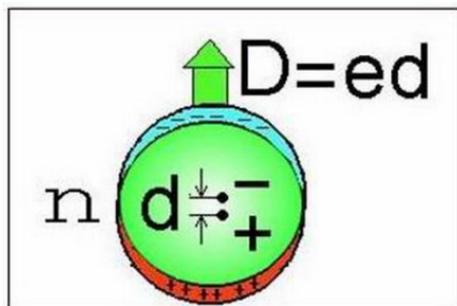


Рис. 7.14. Если представить нейтрон размером с Землю, состоящим из двух противоположно заряженных шаров, центры которых сдвинуты на малую величину d , то в результате это будет нейтральный шар с небольшими напылями отрицательного и положительного зарядов на полюсах. Толщина этих напылей ~ 2 мкм (при радиусе Земли 6 400 км)!

7.3.9. Поляризуемость нейтрона

Если к нейтрону приложить электрическое поле \mathbf{E} , то он слегка деформируется, поскольку к положительному и отрицательному составляющим его зарядам будут приложены противоположные силы. Возникнет наведенный ЭДМ \mathbf{d}_α , причем его величина будет пропорциональна величине приложенного поля:

$$\mathbf{d}_\alpha = \alpha_n \mathbf{E}.$$

Здесь α_n – так называемая электрическая поляризуемость нейтрона. Она характеризует «жесткость» нейтрона, то есть его внутреннюю структуру. Ее удалось измерить только в 1991 г. (группа Й. Шмидмайера в Австрии). Оказалось,

$$\alpha_n = (1,20 \pm 0,20) \cdot 10^{-3} \text{ Фм}^3.$$

Такая поляризуемость соответствует возникновению наведенного ЭДМ $d_\alpha \approx 10^{-27} e \cdot \text{см}$, если к нейтрону приложить поле $\approx 10^8$ В/см, которое соответствует по порядку величины межатомным полям в веществе и приблизительно в 10^3 раз превосходит поля, достижимые в лаборатории.

Конечно, даже такая величина поля совершенно недостаточна, чтобы привести к какому-либо наблюдаемому эффекту. Гораздо более сильные электрические поля имеются вблизи поверхности атомного ядра (например, вблизи ядер свинца они могут достигать величин $\approx 10^{21}$ В/см). Именно эти поля и удалось использовать для измерения электрической поляризуемости нейтрона при рассеянии нейтронов на атомах свинца.

Часть 8. СИММЕТРИИ И БЕТА-РАСПАД

8.1. Загадки бета-распада

Итак, после открытия Беккерелем радиоактивности урана в 1898 г. Резерфорд обнаружил две различные по проникающей способности компоненты радиоактивного излучения, названные им альфа- и бета-излучением, а в 1900 г. Виллард нашел третью, наиболее проникающую компоненту – гамма-излучение, названное так по аналогии.

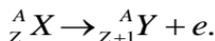
С открытия бета-распада ядер фактически началась история исследований слабого взаимодействия, хотя в те времена такого понятия еще не существовало. Одной из основных проблем в физике начала XX в. стала проблема спектра бета-частиц (электронов), образующихся при бета-распаде, который был измерен Джеймсом Чедвиком (учеником Резерфорда и будущим открывателем нейтрона) в 1914 г. Оказалось, что спектр электронов является непрерывным, то есть энергии электронов, вылетающих из распадающегося ядра, имеют разные, меняющиеся от нуля до некоторого граничного, значения при одних и тех же состояниях начального и конечного ядер. Выглядело это как нарушение закона сохранения энергии – одного из важнейших законов физики.

В это время был уже известен дискретный характер энергетических уровней в атоме (модель Бора – Резерфорда), а в 1922 г. предположение о дискретности уровней в атомном ядре было высказано австрийским физиком Лизой Мейтнер. С этой точки зрения спектр любых вылетающих при распаде ядра частиц должен быть дискретным. Их энергии должны быть равны разностям энергий конечного и начального состояний ядер, между которыми происходит переход при распаде. Таким, например, является спектр альфа-частиц и гамма-квантов при радиоактивном распаде.

Природа бета-распада оставалась загадкой до тех пор, пока Ферми в 1933 г. не построил его теорию, введя новый тип взаимодействия между частицами, используя идею Амбарцумяна и Иваненко о возможности рождения и уничтожения частиц в процессе взаимодействия, а также гипотезу Паули, выдвинутую им в 1931 г. для объяснения сплошного спектра бета-частиц (и спасения закона сохранения энергии), о том, что в этом процессе наряду с электроном испускается легкая нейтральная частица – нейтрино.

8.1.1. Символическая запись бета-распада

Как было установлено, естественный бета-радиоактивный распад состоит в том, что ядра атомов одного элемента самопроизвольно испускают бета-частицы, то есть электроны, и при этом превращаются в ядра другого элемента с атомным номером на единицу большим, но с прежним массовым числом. Символически это превращение записывается в виде следующей реакции:



Здесь ${}^A_Z X$ – исходное ядро; A – массовое число (число нуклонов в ядре); Z – заряд ядра (число протонов в ядре); ${}^A_{Z+1} Y$ – конечное ядро (продукт распада); e – электрон (его заряд равен -1). Число нуклонов (массовое число) в ядре при бета-распаде не изменяется. Заряд же конечного ядра (порядковый номер в таблице Менделеева) увеличивается на единицу.

Рассмотрим загадки бета-распада и их разрешение более подробно.

8.1.2. «Исчезновение» энергии при бета-распаде

Если ядро X самопроизвольно превращается в ядро Y , то это значит, что энергия $W_X = M_X c^2$ ядра X больше, чем энергия $W_Y = M_Y c^2$ ядра Y . Энергия вылетающей при этом бета-частицы (полная энергия) должна быть равна разности энергий (масс) начального и конечного ядра:

$$E_\beta = W_X - W_Y,$$

если пренебречь энергией отдачи. Точнее, эта разность делится между кинетической энергией дочернего ядра Y (энергией отдачи) и энергией электрона

$$W_X - W_Y = M_Y V^2/2 + E_\beta.$$

Энергию отдачи легко найти, используя сохранение импульса $M_Y V = m v$ (здесь m – полная масса электрона, то есть его полная энергия, деленная на c^2), откуда $V^2 = m^2 v^2 / M_Y^2$, и энергия отдачи получается равной $M_Y V^2/2 = m^2 v^2 / 2 M_Y = (m c^2 v^2 / 2 c^2) \cdot (m / M_Y) = E_\beta (\beta^2 / 2) \cdot (m / M_Y) \ll E_\beta$. Здесь мы учли, что ядра являются существенно нерелятивистскими, поскольку их кинетические энергии на много порядков меньше энергий покоя (которые имеют порядок от единиц до сотен ГэВ). Таким образом, действительно, энергией отдачи можно с хорошей точностью пренебречь.

Поскольку все исходные ядра X одинаковы, равно как одинаковы и все получающиеся из них ядра Y , все вылетающие бета-частицы должны иметь одну и ту же энергию. Опыты же показывают, что энергия большинства бета-частиц меньше, чем разность энергий $W_X - W_Y$. Точнее, бета-

частицы имеют различные энергии, и все они лежат в пределах от нуля до максимального значения, равного $W_X - W_Y$. Примеры бета-спектров от распадов нейтрона и тяжелого изотопа висмута ^{210}Bi приведены на рис. 8.1, 8.2.

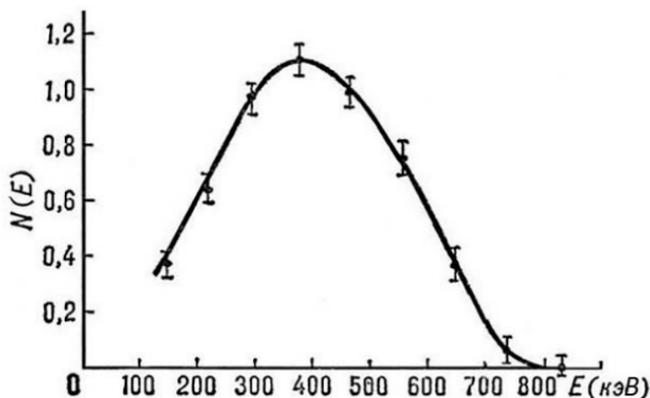


Рис. 8.1. Бета-спектр нейтрона (период полураспада – приблизительно 10 мин.). По оси абсцисс отложена кинетическая энергия электронов E в кэВ, по оси ординат – число электронов $N(E)$ в относительных единицах (вертикальными черточками обозначены пределы ошибок измерений электронов с данной энергией)

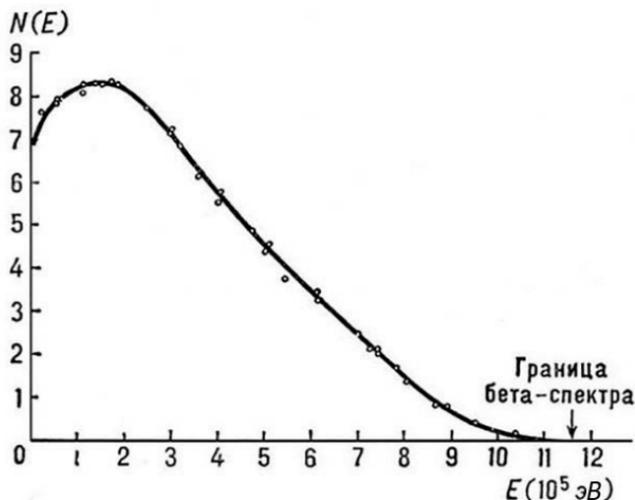


Рис. 8.2. Бета-спектр ^{210}Bi как пример бета-спектра тяжелого элемента (^{210}Bi – один из продуктов распада радия, раньше назывался RaE)

Например, для бета-частиц, испускаемых ядрами висмута $^{210}_{83}\text{Bi}$ (период полураспада 5 дней), максимальное значение энергии около 1 МэВ, а средняя энергия, приходящаяся на долю одной частицы, меньше чем 0,4 МэВ.

Создавалось впечатление, что бета-распад – это процесс, в котором, в нарушение закона сохранения энергии, энергия пропадает бесследно. Некоторые физики склонны были думать, что закон сохранения энергии, безусловно, верный в мире макроскопических процессов, «необязателен» для некоторых процессов, связанных с элементарными частицами. К мысли о возможности нарушения закона сохранения энергии склонялся даже такой физик, как Нильс Бор. В 1931 г. на Римской конференции по ядерной физике он выступил с идеей о несохранении энергии! Высказывались и другие мнения, что, возможно, найдутся процессы, при которых энергия не пропадает бесследно (как в случае бета-распада), а, наоборот, возникает из ничего.

8.1.3. Нейтрино

Закон сохранения энергии был, однако, «спасен» швейцарским физиком-теоретиком Вольфгангом Паули.

В конце 1930 г. на конференции физиков в Тюбингенском университете в Германии огласили письмо Паули от 4 декабря. Оно было адресовано Гансу Гейгеру и Лизе Мейтнер, но предназначалось для всех участников: «Дорогие радиоактивные дамы и господа. Я прошу Вас выслушать со вниманием в наиболее удобный момент посланца, доставившего это письмо. ...имея в виду... непрерывный бета-спектр, я предпринял отчаянную попытку спасти «обменную статистику» и закон сохранения энергии. Именно имеется возможность того, что в ядрах существуют электрически нейтральные частицы, которые я буду называть «нейтронами» и которые обладают спином 1/2... Масса «нейтрона» по порядку величины должна быть сравнимой с массой электрона и, во всяком случае, не более 0,01 массы протона. Непрерывный бета-спектр тогда стал бы понятным, если предположить, что при бета-распаде вместе с электроном испускается еще и «нейтрон», таким образом, что сумма энергий «нейтрона» и электрона остается постоянной.

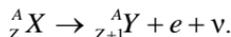
Я признаю, что такой выход может показаться на первый взгляд маловероятным... Однако, не рискуя, не выиграешь; серьезность положения с непрерывным бета-спектром хорошо проиллюстрировал мой уважаемый предшественник г-н Дебай, который недавно заявил мне в Брюсселе: «О... об этом лучше не думать вовсе, как о новых налогах».

Следовательно, необходимо серьезно обсудить каждый путь к спасению. Итак, уважаемый радиоактивный народ, подвергните это испытанию и судите».

Таким образом, Паули высказал предположение, что при бета-распаде из ядра вылетает не только электрон, но и еще одна нейтральная частица, которую он назвал «нейтрон» (заметим, что нейтрон к тому времени еще не был открыт), на долю которой и приходится недостающая энергия. Но почему эта частица никак себя не обнаруживает: не ионизует газ, как это делает электрон; ее энергия при столкновениях с атомами не переходит в тепло и т. д.? Паули объяснял это тем, что придуманная им частица электрически нейтральна и практически не обладает массой покоя.

На Сольевеевском конгрессе 1933 г. в Брюсселе Паули выступил с рефератом о механизме бета-распада с участием легкой нейтральной частицы со спином $1/2$, в котором, со ссылкой на предложение итальянского физика Энрико Ферми, назвал гипотетическую частицу «нейтрино». Это выступление было фактически первой официальной публикацией, посвященной нейтрино.

Таким образом, реакцию бета-распада следует писать так:



8.1.4. Нарушение законов сохранения импульса и момента импульса при бета-распаде

Предположение В. Паули о существовании новой частицы, нейтрино, спасло не только закон сохранения энергии, но и другие важнейшие законы физики: законы сохранения импульса и момента количества движения. Поскольку спины (то есть собственные моменты) нейтрона и протона равны $1/2$ (в единицах постоянной Планка \hbar), то для сохранения спина в правой части уравнений бета-распада может находиться лишь нечетное число частиц со спином $1/2$. В частности, при β^- -распаде свободного нейтрона

$${}^1_0 n \rightarrow {}^1_1 p + e + \nu$$

только появление антинейтрино исключает нарушение закона сохранения момента количества движения:

$$n^\uparrow = p^\uparrow + e^\uparrow + \nu^\downarrow \quad \text{либо} \quad n^\uparrow = p^\uparrow + e^\downarrow + \nu^\uparrow,$$

здесь стрелками обозначены направления спинов, то есть

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \quad \text{или} \quad \frac{1}{2} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2}.$$

То же самое можно сказать и об импульсе. Поскольку нейтрино уносит и импульс, то без него закон сохранения импульса в бета-распаде был бы нарушен.

Вольфганг Эрнст Паули (*Wolfgang Ernst Pauli*; 1900 –1958) – австрийско-швейцарский физик, родился в Вене. Автор гипотезы о существовании невидимой частицы – нейтрино.

Выдвинул предположение, что электроны обладают неким свойством, которое позже Сэмюэл Гаудсмит и Джордж Уленбек назвали спином, или собственным угловым моментом (моментом количества движения). В магнитном поле у спина электрона имеются две возможные ориентации: ось спина может быть направлена в ту же сторону, что и поле, или в противоположную сторону. Орбитальное движение электрона в атоме определяет еще одну ось, которая может быть ориентирована по-разному в зависимости от приложенного внешнего поля. Различные возможные комбинации спиновой и орбитальной ориентации слегка отличаются энергетически, что приводит к увеличению числа атомных энергетических состояний. Переходы электрона с каждого из этих подуровней на некоторую другую орбиту соответствуют слегка отличающимся длинам световых волн, чем и объясняется тонкое расщепление спектральных линий.



Сформулировал закон, который стал известен как принцип запрета Паули и согласно которому никакие два электрона в системе не могут иметь одинаковые наборы квантовых чисел. Так, каждая оболочка в атоме может содержать лишь ограниченное число электронных орбит, определяемых допустимыми значениями квантовых чисел.

В 1945 г. был удостоен Нобелевской премии по физике «за открытие принципа запрета, который называют также принципом запрета Паули». Он не присутствовал на церемонии вручения премии, и ее от его имени получил сотрудник американского посольства в Стокгольме.

Идея Паули о новой частице быстро получила всеобщее признание. А сама гипотеза Паули естественным образом вошла в теорию бета-распада, созданную Ферми в конце 1933 – начале 1934 г. Однако прежде чем стать равноправным членом семьи элементарных частиц, нейтрино еще долгое время оставались чисто гипотетическими частицами. Совершенно необходимые для объяснения многих легко наблюдаемых превращений, сами они на протяжении более 20 лет оставались неуловимыми.

Наблюдение реакций, связанных с нейтрино, стало возможным только после создания ядерных реакторов. Физики многих стран пытались экспериментально подтвердить существование теоретически «вычисленной» частицы. Ведь для окончательного доказательства существования

нейтрино нужно было увидеть его непосредственное воздействие на вещество. Но получилось так, что первыми удалось обнаружить не нейтрино, а его античастицы – антинейтрино, которые в результате бета-распада осколков деления урана при работе атомного реактора испускаются в громадном количестве. Такой опыт был осуществлен в 1953 г. американскими учеными Фредериком Райнесом и Клайдом Коуэном. Им удалось обнаружить характерную цепочку событий, вызванных антинейтрино. Этот эксперимент, с учетом «прозрачности» свойств частиц, получил название «Проект «Полтергейст»».

За участие в этих исследованиях и за последующие эксперименты Фредерик Райнес был удостоен Нобелевской премии 1995 г.

8.2. Теория бета-распада Ферми

Итак, как мы отметили, гипотеза Паули вошла в теорию бета-распада, созданную Ферми, которая позволила описать явления электронного (β^-) и позитронного (β^+) распадов и K -захвата. Появилась теоретическая возможность ввести два разных нейтрино: антинейтрино, рождающееся в паре с электроном, и нейтрино, рождающееся в паре с позитроном.

8.2.1. Несколько слов о теории относительности и релятивистской инвариантности

Сейчас мы знаем, что классическая механика, основанная на уравнениях Ньютона, справедлива, лишь когда скорости всех рассматриваемых объектов существенно меньше скорости света: $v \ll c$. Она оказалась *нерелятивистским* приближением к *релятивистской* механике (англ. *relativity* – относительность, *relative* – относительный). Уравнения классической механики становятся точными, если только $v/c \rightarrow 0$, то есть либо при $v \rightarrow 0$, либо при $c \rightarrow \infty$. Однако, как мы видели, они могут объяснить большую часть явлений физического мира. Спрашивается, зачем тогда изучать релятивистскую механику, если большинство встречающихся в повседневной жизни скоростей значительно меньше скорости света? На этот счет можно привести несколько причин.

1. Одной из главных задач физики и техники является изучение и использование свойств электромагнитных волн (свет, радиоволны, рентгеновское и гамма-излучение), скорость которых в вакууме $v = c$. Сейчас в самых различных областях науки, техники, медицины и так далее применяются электронные микроскопы, электронно-лучевые трубки, ускорители заряженных частиц, в которых частицы движутся со скоростями, близкими к скорости света. В суперколлайдерах встречные пучки частиц разгоняются до громадных энергий. Эти частицы сталкиваются, рождая в результате множество

других элементарных частиц, исследуя которые можно получать информацию о свойствах взаимодействия и о структуре самих частиц. Все эти приборы в принципе не могли бы работать, если бы для их расчетов не применялась теория относительности.

2. Внутри тяжелых атомов электроны движутся со скоростями, близкими к скорости света, поэтому для понимания их свойств и расчетов спектров также необходима теория относительности.

3. В ядерной физике, физике элементарных частиц, при исследовании излучения, приходящего на Землю от Солнца или из космоса, мы также сталкиваемся со скоростями частиц, близкими к скорости света.

4. В современной астрофизике постоянно встречаются релятивистские объекты: удаленные галактики, которые движутся относительно нас со скоростями, близкими к скорости света; новые, сравнительно недавно открытые физические объекты: нейтронные звезды, пульсары, черные дыры, для понимания физической природы которых существенной является теория относительности.

5. Кроме того, большинство людей слышало о замедлении времени, парадоксе близнецов, лоренцовом сокращении длины, соотношении $E = mc^2$, а также о том, что ничто не может двигаться быстрее света. Таким образом, эти существенно физические факты становятся элементами нашей общей культуры и цивилизации. Поэтому каждый образованный человек должен понимать хотя бы главные идеи, на которых основана эта теория.

6. Заметим также, что теория относительности противоречит нашему повседневному опыту, поэтому ее приняли не сразу. Людям пришлось перейти некоторый психологический барьер, развить воображение и научиться смотреть на вещи более широко и критически, хотя «борцы» с теорией относительности сохранились и до нашего времени.

8.2.1.1. Относительность

Давайте начнем с самой идеи относительности. Что это такое? Под относительностью мы всегда понимаем независимость физических явлений от таких частных обстоятельств, как момент времени, положение в пространстве, состояние движения, и, может быть, от чего-то еще, о чем мы пока не догадываемся. Действительно, чтобы определить наше место в пространстве, надо выбрать начало отсчета, систему координат и относительно нее уже определять местоположение.

Точно так же относительным является и направление в пространстве. Причем выбор оси в пространстве, относительно которой определяются направления, является произвольным. От него физические явления не зависят. То же самое относится к выбору начала отсчета времени и начала си-

стемы координат в пространстве. Это и означает, что величины, характеризующие положение и ориентацию в пространстве, а также момент времени, когда произошло некоторое событие, являются относительными.

В этом суть понятия *инвариантности* законов природы относительно некоторых преобразований, таких как трансляция в пространстве (перенос начала координат), трансляция во времени (перенос начала отсчета времени), поворот в пространстве (изменение направления, относительно которого отсчитываются углы). Это означает, что законы природы одинаковы на Земле и в любой другой точке Вселенной и не зависят от направления в пространстве (эту инвариантность связывают с однородностью и изотропностью пространства). Также инвариантность относительно выбора начала отсчета времени связывается с однородностью времени.

Если бы существовало выделенное начало отсчета (или ось) в пространстве, то положения (или направления) носили бы абсолютный характер; в других системах отсчета законы, по которым происходят явления в природе, были бы иные. Первый шаг в понимании этого (и, видимо, самый трудный) был сделан польским астрономом и врачом Николаем Коперником (1473–1543) в книге «О вращении небесных сфер», которая вышла в год его смерти. Напомним, как сильно отличались взгляды на относительность до Коперника и после него. До Коперника в течение 1,5 тысячи лет господствовали взгляды древнегреческих ученых и философов Аристотеля (I в. до н. э.) и Птолемея (II в. н. э.). Считалось, что Земля – это центр Вселенной (выделенное начало отсчета), то есть ее положение абсолютно, тем самым подразумевалось, что все явления на Земле носят исключительный характер и совершенно нетипичны для других мест. «Тяжелые» вещи стремятся занять «естественное» положение на поверхности Земли, поэтому падают, а «легкие» поднимаются вверх, стремясь к своему «естественному» положению. То, что правильно «здесь», не пригодно где-нибудь «там» из-за специфических свойств этого самого «здесь». И только благодаря идеям Коперника, а после – Галилея и Ньютона, люди с большим трудом осознали, что все происходящее где-то «там» в общем-то не очень отличается от происходящего «здесь».

Революционный характер взглядов Коперника противоречил догматам церкви. Однако это было осознано лишь после того, как итальянский ученый Галилео Галилей (1564–1642) развил его учение, опубликовав книги «О движении» и «Механика», и изобрел телескоп, позволивший наблюдать движение небесных тел. В 1611 г. Галилей демонстрирует Папе Павлу V изобретенный им телескоп и просит вынести окончательное решение о справедливости гелиоцентрической системы мира. В результате против Галилея в 1615 г. был начат первый процесс по обвинению в ереси, а в 1616 г. декретом инквизиции книга Коперника была внесена «впредь до исправления» в «Индекс запрещенных книг» и была под запретом до 1833 г. Галилея же

по поручению Папы вызвал кардинал и великий инквизитор Католической церкви Беллармино и заверил, что лично ему ничего не грозит, однако впредь всякая поддержка «коперниканской ереси» должна быть прекращена.

Таким образом, независимость явлений от места фактически понял уже Коперник, поместив центр Вселенной (то есть начало отсчета) на Солнце и заявив, что Земля, ничем не отличаясь от других планет, как и они, движется вокруг Солнца.

И этот довольно понятный с нашей точки зрения шаг (на который, тем не менее, понадобилось полтора тысячелетия) повлек за собой лавину новых представлений и открытий в понимании природы. Важнейшим и наиболее трудным из них был следующий шаг, который сделали Галилео Галилей и выдающийся англичанин Исаак Ньютон практически в течение столетия после выхода книги Коперника. Они поняли *ограниченную* зависимость явлений от состояния движения. Это обстоятельство нелегко осознать даже сейчас. И только нашему гениальному современнику Альберту Эйнштейну в 1904 г. удалось до конца понять и развить эту идею и создать теорию относительности.

Вообразим философа, не знакомого с физикой. Он мог бы дать два альтернативных способа определения зависимости или независимости явлений от состояния движения.

Абсолютная зависимость. Можно представить, что существует одно выделенное, привилегированное состояние движения – назовем его покоем, – а все другие состояния движения принципиально отличаются от него. Приблизительно такая точка зрения господствовала до Галилея, например, в учении Аристотеля.

Абсолютная независимость. Можно также сказать, что вопрос о движении вообще не должен возникать в физике, и от движения совсем ничего не зависит.

Вспомним Александра Сергеевича Пушкина:

Движенья нет, сказал мудрец брадатый.
Другой смолчал и стал пред ним ходить.
Сильнее бы не мог он возразить;
Хвалили все ответ замысловатый.
Но, господа, забавный случай сей
Другой пример на память мне приводит:
Ведь каждый день пред нами солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей.

На самом же деле в природе не реализуется ни одна из приведенных альтернатив, а существует множество выделенных состояний движения, а именно всех состояний инерциального, то есть равномерного и прямоли-

нейного движения. Так что можно говорить о равноправии всех наблюдателей, движущихся инерциально в произвольных направлениях с произвольными (но постоянными) скоростями, и неравноправии между ними и любыми другими наблюдателями. Это означает, что законы механики одинаковы во всех инерциальных системах. Находясь в такой системе, невозможно определить ее «абсолютную» скорость (то есть определить, движется система или нет), поскольку она ничем не отличается от «покоящейся» системы. Со времен Галилея и Ньютона скорости рассматриваются как относительные, а ускорения – как абсолютные.

Следует понимать, насколько тесно связана картина мира Николая Коперника с независимостью явлений от скорости. Человек с улицы еще лет 350 назад мог бы сказать, что очень глупо считать, что Земля движется вокруг Солнца, ведь никто из нас не ощущает никакого движения. Этот человек будет неправ только благодаря независимости физических явлений от скорости, и поэтому коперниковская схема может быть сохранена. Таким образом, уже в самой картине Коперника неявно подразумевалась мысль о такой независимости.

Но только Галилей и затем Ньютон это ясно поняли и точно сформулировали принцип относительности для механических явлений. Эйнштейн же сделал следующий шаг: он распространил принцип относительности на все физические явления вообще.

Сейчас это кажется естественным, поскольку чисто механических явлений не бывает, поскольку все тела состоят из атомов и молекул, которые связаны между собой электромагнитными силами. В свою очередь, атомы состоят из ядер и электронов, также взаимодействующих между собой электромагнитными силами. Внутри ядра же действуют ядерные силы.

Что же заставило Эйнштейна опять задуматься над принципом относительности, хотя, казалось, в течение предыдущих 200 лет все хорошо описывалось и так, и повода для таких размышлений не было? Почему стали различать механические и электромагнитные явления?

Дело вот в чем. В 1860–1865 гг. английским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом были получены носящие его имя знаменитые уравнения, описывающие электрические и магнитные явления. Эти уравнения оказались разными для разных инерциальных наблюдателей, описываемых по Ньютону. Поэтому сначала показалось, что движение можно заметить по электромагнитным явлениям, то есть принцип относительности для них не выполняется.

Однако все попытки обнаружить движение Земли таким способом не увенчались успехом. Таким образом, что-то неладное творилось в то время с уравнениями физики. И выход нашел Эйнштейн в своей работе 1904 г., которая называлась «К электродинамике движущихся тел».

Независимость всех физических явлений от выбора инерциальной системы отсчета и есть суть релятивистской инвариантности.

8.1.1.2. Основные идеи (постулаты) теории относительности

В механике Ньютона сила (и потенциальная энергия) взаимодействия зависит только от расстояния между частицами: $\mathbf{F} = \mathbf{F}(|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|)$. Если мы изменим положение первой частицы в некоторый момент времени, то вторая частица почувствует это изменение в тот же момент времени, поскольку изменится сила, действующая на нее. Это означает, что распространение взаимодействия происходит с бесконечной скоростью (так называемое *дальнодействие* – действие на расстоянии), то есть силовое поле мгновенно меняется во всем пространстве, стоит только изменить положение одной частицы. Это еще во времена Ньютона вызывало сомнения, однако все экспериментальные данные хорошо описывались в рамках такого дальнего действия.

Предположим теперь, что существует предельная скорость распространения взаимодействия, и она конечна. Это означает *близкодействие*, и вот в каком смысле: при изменении положения частицы поле изменяется сначала около самой частицы, потом это изменение начинает распространяться дальше и дальше, причем процесс распространения происходит с конечной скоростью. При таком подходе изменяется само понятие силового поля: оно становится материальным объектом, который переносит взаимодействие с конечной скоростью, и, следовательно, объектом, обладающим энергией и импульсом. Таким образом, «переносчик» взаимодействия приобретает свойства частицы.

Далее, если мы допустили существование предельной скорости, то из принципа относительности следует, что она одинакова во всех системах отсчета. Тогда нельзя будет по изменению этой скорости определить, движется система или нет, как это пытались сделать, измеряя скорость света в разных направлениях. Таким образом, скорость света как раз и ведет себя так, как должна вести себя предельная скорость в соответствии с принципом относительности. Поэтому и не удалось заметить движения Земли относительно эфира. При таком подходе понятия эфира вообще не требуется. Для построения теории относительности достаточно этих двух постулатов, которые можно сформулировать следующим образом.

1. Все физические явления происходят во всех инерциальных системах отсчета одинаково (принцип относительности).

2. Скорость света в вакууме постоянна и одинакова во всех инерциальных системах отсчета, то есть скорость света не зависит от движения его источника или приемника (существование предельной скорости распространения взаимодействий).

Из второго постулата вытекает инвариантность (то есть независимость от выбора инерциальной системы отсчета) величины пространственно-временного *интервала*:

$$c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = c^2t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = \text{inv},$$

аналога расстояния в четырехмерном пространстве-времени. Заметим, что фронт световой волны, возбужденной в начале координат, расширяется по закону

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2,$$

то есть все точки фронта связаны нулевым интервалом.

Преобразования координат и времени, которые описывают переход от одной инерциальной системы отсчета в другую, движущуюся относительно первой со скоростью \mathbf{v} , и оставляют интервал неизменным, называются преобразованиями Лоренца. При $c \rightarrow \infty$ эти преобразования переходят в известные преобразования Галилея, которые выглядят следующим образом:

$$t' = t; \quad \mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{v}t.$$

Таким образом, релятивистскую инвариантность можно сформулировать как инвариантность уравнений движения (классических или квантовых) относительно преобразований Лоренца.

8.2.2. Четырехфермионное взаимодействие Ферми

В теории Ферми $\beta^-(\beta^+)$ -распад есть превращение нейтрона n (протона p) внутри ядра в протон (нейтрон) с испусканием электрона (позитрона) и антинейтрино (нейтрино), то есть лептон-антилептонной пары. Таким образом, в данном взаимодействии участвуют четыре фермиона (частицы с полупуцелым спином): два нуклона и два лептона. Поэтому Ферми назвал это взаимодействие четырехфермионным.

Давайте проследим ход его рассуждений, который является весьма поучительным и содержит многие идеи современной релятивистской квантовой теории. Рассмотрим наиболее простой процесс взаимодействия двух частиц (например, это может быть рассеяние протона на нейтроне), рис. 8.3. Мы обозначили буквой x *координаты и время события*, то есть $x = \mathbf{r}, t$; $x_1 = \mathbf{r}_1, t_1$ и т. д. Как мы уже говорили, взаимодействие, как следствие близкого действия, происходит следующим образом: частица (например, нейтрон), придя из точки x_3 в точку x' (в момент времени t'), испускает отрицательный пи-мезон, превращаясь в протон, а начальный протон в момент $t > t'$ поглощает этот пи-мезон и превращается в нейтрон.

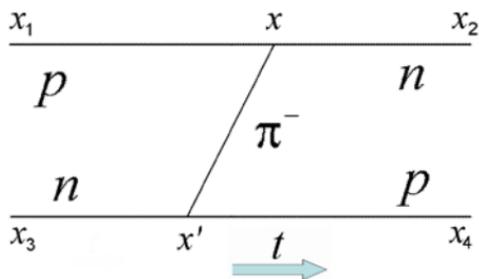


Рис. 8.3. Взаимодействие нейтрона с протоном за счет обмена пи-мезоном (взаимодействие Юкавы). Внизу стрелкой указано направление времени

Пи-мезон может улететь от протона максимум на величину комптоновской длины волны

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\hbar}{m_{\pi} c}.$$

Действительно, из теории относительности следует, что самопроизвольное рождение частицы означает изменение энергии по крайней мере на величину mc^2 (нарушается закон сохранения энергии), а из квантовой механики (соотношения неопределенностей) вытекает, что такое изменение возможно лишь на время $\Delta t < \hbar/mc^2$. За это время частица может улететь на расстояние, не большее $c\Delta t = \hbar/mc$. Это и есть комптоновская длина волны частицы. Этой длиной определяется радиус мезонного «облака», окружающего нуклон, то есть радиус нуклон-нуклонного взаимодействия, поскольку нуклон «почувствует» присутствие второго нуклона только на расстоянии, меньшем этого).

Именно так, исходя из размера нуклона (который был получен из экспериментов по рассеянию альфа-частиц и протонов на ядрах), в 1935 г. Хидэки Юкава оценил массу «промежуточной» частицы – мезона, которая является «переносчиком» *сильных* взаимодействий.

Напомним, что гипотезу о природе ядерных сил высказали независимо друг от друга Д. Д. Иваненко и И. Е. Тамм. В статье, опубликованной в журнале Nature в 1934 г., Тамм рассмотрел ядерные взаимодействия как процесс обмена легкими частицами между нуклонами. Теория Тамма не давала количественного совпадения, однако общая идея ядерных взаимодействий, высказанная Иваненко и Таммом, сохранилась в ядерной физике. На основе этой идеи Юкава и предсказал существование мезонов. Заметим, что если масса промежуточной частицы равна нулю (как у фотона), то для потенциала взаимодействия получается обычный закон Кулона.

Что будет, если мы начнем увеличивать массу промежуточной частицы? Радиус взаимодействия будет уменьшаться и при бесконечной массе станет равным нулю, то есть частицы будут взаимодействовать, только столкнувшись в точке (такое взаимодействие так и называется – «точечным»). На самом деле точечным в квантовой механике можно считать взаимодействие, радиус которого много меньше длин волн сталкивающихся частиц. Поэтому масса промежуточной частицы должна быть большой, не обязательно бесконечной. Сейчас известно, что масса частицы – «переносчика» слабых взаимодействий приблизительно равна 70 ГэВ (то есть порядка 70 масс нуклона).

Именно такое «точечное» взаимодействие и предложил Ферми для описания бета-распада. Идею своей теории слабых взаимодействий Ферми сформулировал в статье, вышедшей в декабрьском номере 1933 г. итальянского журнала *Ricerca Scientifica*, а в начале 1934 г. в немецком *Zeitschrift für Physik* была опубликована его классическая статья «К теории β -лучей», когда еще никакой теории ядерных сил не существовало и промежуточных частиц никто не рассматривал.

Для точечного взаимодействия картинку нужно перерисовать следующим образом (рис. 8.4).

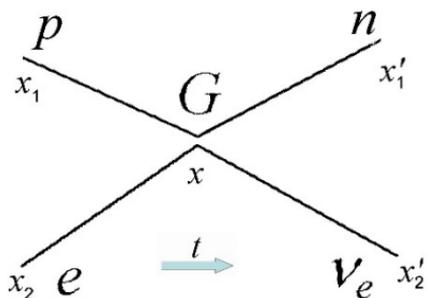


Рис. 8.4. Взаимодействие нуклона с лептоном за счет обмена очень массивной заряженной частицей. Точно так же описывается и электронный захват ядром атома, когда протоном ядра захватывается один из электронов электронной оболочки атома с превращением протона в нейтрон и испусканием нейтрино

В точке x происходит взаимодействие нейтрона с электроном, в результате протон превращается в нейтрон, электрон – в нейтрино. Иными словами: нуклон и лептон столкнулись в точке x , затем разлетелись, при этом в результате столкновения изменились их некоторые свойства, например электрические заряды (суммарный заряд, естественно, сохранился). Это и есть четырехфермионное взаимодействие Ферми.

Однако в теории относительности время перестает быть абсолютным: то, что было «раньше» в одной системе отсчета, может стать «позже» в другой системе. Посмотрим на рис. 8.4. Можно найти такую систему отсчета, в которой момент t_2 наступит после t . Это означает, что в этой системе отсчета

частица возникает после взаимодействия (рис. 8.5). А это уже не что иное, как β^+ -распад протона, причем родиться должен позитрон, в силу закона сохранения заряда. С рассматриваемой точки зрения позитрон есть электрон, движущийся назад во времени.

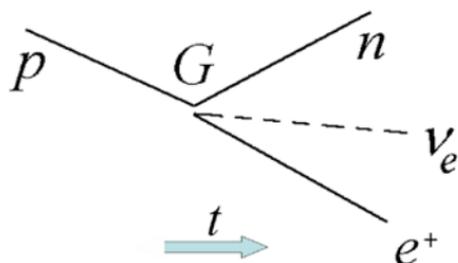


Рис. 8.5. β^+ -распад протона

Таким образом, из релятивистской инвариантности следует, что если теория описывает рассеяние частиц, то она же должна описывать и распады, поскольку это есть один и тот же процесс, только в разных системах отсчета. Точно так же должны описываться и β^- -распад нейтрона (рис. 8.6), и рассеяние нейтрино на нуклоне.

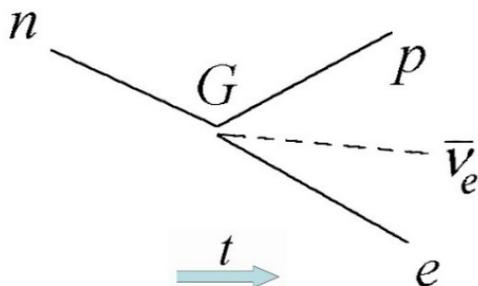


Рис. 8.6. β^- -распад нейтрона

В силу однородности и изотропности пространства и однородности времени энергия такого точечного взаимодействия двух частиц не должна зависеть ни от координат точки, ни от направлений, ни от времени, то есть это должна быть постоянная. Эта постоянная называется константой Ферми и обозначается латинской буквой G (или G_F).

В результате все вероятности бета-распадов и спектры бета-электронов с хорошей точностью были описаны единственной размерной константой Ферми:

$$G = 10^{-5} \frac{\hbar^3}{m_p^2 c} = 1,436 \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3 \approx 0,9 \cdot 10^{-37} \text{ эВ} \cdot \text{см}^3.$$

Безразмерное число 10^{-5} характеризует степень малости взаимодействия.

Константа Ферми мала, поэтому малы вероятности процессов бета-распада, которые пропорциональны G^2 . После открытия мюонов, пи-мезонов и странных частиц оказалось, что распады этих частиц обусловлены тем же слабым четырехфермионным взаимодействием, с той же константой G . Удивительный успех этой теории в том, что при колоссальном разбросе времен жизни τ (например, мюоны живут $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ с, а нейтрон – около 900 с, времена жизни ядер по отношению к бета-распаду простираются до многих тысяч лет) она описывает все эти времена одной константой. Эта разница естественным образом объясняется различным энерговыделением (или энергией бета-распада) Δ – разностью массы покоя начальной частицы и суммарной массы покоя конечных частиц. Если пренебречь массами покоя электрона и нейтрино, то с достаточно хорошей точностью она будет равна

$$\Delta \approx (M_Z - M_{Z+1}) c^2.$$

Энергии бета-распада лежат в широких пределах: от 0,0186 МэВ (для β^- -распада трития: ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$) до 16,6 МэВ (для β^+ -распада азота: ${}^{12}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C}$).

Большое различие во временах жизни ядер объясняется тем, что величина τ^{-1} (обратное время жизни, имеющее смысл вероятности распада в единицу времени) получилась пропорциональной пятой степени энерговыделения Δ :

$$\tau^{-1} \sim G^2 \Delta^5.$$

Периоды полураспада бета-радиоактивных ядер простираются от $1,3 \cdot 10^{-2}$ с (азот ${}^{12}\text{N}$) до $1,2 \cdot 10^9$ лет (природный радиоактивный изотоп калия ${}^{40}\text{K}$, используемый для определения возраста минералов, содержащих этот изотоп).

Последующие исследования новых типов открытых частиц («очарованных» и «прелестных», B -мезонов, τ -лептонов) подтвердили этот закон. Таким образом, слабое взаимодействие оказалось универсальным, ответственным за «медленные» распады всех элементарных частиц.

8.2.3. Откуда берутся электроны

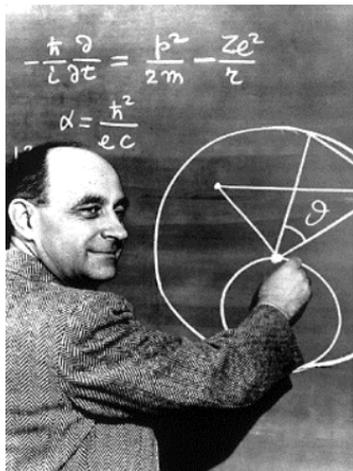
Теория Ферми ответила еще на один вопрос: откуда в ядре берутся электроны? Как оказалось, после открытия Чедвиком нейтрона, атомные ядра всех элементов состоят только из протонов и нейтронов. Как же из ядер могут вылетать электроны, которых там нет, и нейтрино, которых там тоже нет?

Объяснить этот удивительный факт (из ядра вылетает то, чего там нет) можно только тем, что частицы – протоны и нейтроны, образующие ядро, – способны взаимно превращаться друг в друга. Это находит свое естественное объяснение в релятивистской теории, из которой следует, что число частиц в принципе не сохраняется, они могут рождаться и исчезать, если позволяют законы сохранения, такие как законы сохранения заряда, числа лептонов, барионов (так называются сильно взаимодействующие частицы с полуцелым спином) и, может быть, некоторых других строго сохраняющихся величин. В частности, бета-распад состоит в том, что один из нейтронов, входящих в ядро радиоактивного элемента, превращается в протон. При этом в ядре оказывается одним протоном больше, чем было, а общее число частиц остается прежним. Просто один из нейтронов стал протоном. Но если бы дело только тем и ограничилось, был бы нарушен закон сохранения электрического заряда. Природа таких процессов не допускает! Так что вместе с превращением нейтрона в протон в ядре рождаются электрон, отрицательный заряд которого компенсирует положительный заряд появившегося протона, и нейтрино, которое уносит определенную долю энергии. Таким образом, при бета-распаде в ядре происходит превращение одного из нейтронов в протон и рождение двух частиц – электрона и нейтрино. Протон остается в ядре, электрон же и нейтрино, которым в ядре быть «не полагается», вылетают из него. Напомним, что идея о возможности рождения и уничтожения частиц первоначально принадлежала Амбарцумяну и Иваненко (1930), у Ферми же она получила конкретное воплощение в его теории.

Процесс бета-распада вполне напоминает процесс испускания светового кванта (фотона). Бета-частица и нейтрино рождаются в момент перехода ядра из одного состояния в другое, аналогично тому как фотон испускается атомом при переходе электрона, входящего в состав электронной оболочки атома, с одного энергетического уровня на другой. Именно этой аналогией сначала и пользовался Ферми, когда строил свою теорию.

Кроме того, с помощью теории Ферми была рассчитана форма спектра бета-электронов, оказавшаяся вблизи верхней границы энергии бета-электронов очень чувствительной к массе m_ν нейтрино. Сравнение теоретической и экспериментальной формы спектра показало, что масса нейтрино много меньше массы электрона (и, возможно, равна нулю). Теория Ферми

объяснила все основные черты бета-распада, и ее успех привел физиков к признанию нейтрино. Однако сомнения в существовании этой частицы еще оставались вплоть до прямого ее обнаружения.



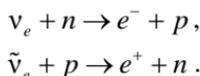
Энрико Ферми (*Enrico Fermi*; 1901–1954) – итальянский физик, внесший большой вклад в развитие современной физики.

После окончания в 1922 г. Пизанского университета учился в Германии и Нидерландах. В 1926–1938 гг. – профессор Римского университета. В 1938 г. эмигрировал из фашистской Италии. В 1939–1945 гг. – профессор Колумбийского университета, руководил исследовательскими работами США в области использования ядерной энергии. С 1946 г. – профессор Чикагского университета.

Ферми принимал деятельное участие в создании основ квантовой физики. В 1925 г. разработал статистику частиц, подчиняющихся принципу Паули (статистика Ферми – Дирака). В 1934 г. создал теорию взаимодействия, ответственного за бета-распад. В 1934–1938 гг. Ферми с сотрудниками заложил основы нейтронной физики; впервые наблюдал искусственную радиоактивность, вызванную бомбардировкой нейтронами ряда элементов (в том числе урана), открыл явление замедления нейтронов и создал теорию этого явления (Нобелевская премия по физике 1938 г.). В 1942 г. впервые осуществил управляемую ядерную цепную реакцию в первом в мире ядерном реакторе.

8.3. Эксперименты по обнаружению нейтрино

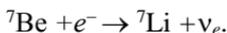
Имеется две возможности экспериментального обнаружения нейтрино. Первая – прямое наблюдение процесса взаимодействия нейтрино с веществом. Это процесс обратного бета-распада, впервые был рассмотрен Х. Бете и Р. Пайерлсом в 1934 г. Обратным бета-распадом называются реакции (существование которых следует из релятивистской инвариантности и которые также описываются теорией Ферми):



Эти реакции идут как на свободных, так и на связанных в ядрах нуклонах. Оценка вероятности (сечения) поглощения нейтрино дала поразительный результат: в твердом веществе нейтрино с энергией, характерной для бета-распада, должно пройти расстояние порядка сотен световых лет,

прежде чем будет захвачено ядром. В 30–40-х гг. обнаружить такую частицу казалось вообще невозможным.

Другой путь – наблюдение отдачи ядра в момент испускания нейтрино, впервые был рассмотрен советским физиком А. И. Лейпунским. В 1938 г. А. И. Алиханов и А. И. Алиханьян предложили использовать для этой цели реакцию K -захвата в ${}^7\text{Be}$. Ядро ${}^7\text{Be}$ захватывает электрон из K -оболочки атома и испускает нейтрино, превращаясь в ядро ${}^7\text{Li}$:



При этом, если ν_e – реальная частица, ${}^7\text{Li}$ получает импульс, равный и противоположный по знаку ее импульсу. Это косвенный путь подтверждения существования нейтрино еще и по недостатку импульса. Первый успешный опыт с этой реакцией был выполнен американским физиком Дж. Алленом в 1942 г. Оказалось, что энергия отдачи ионов ${}^7\text{Li}$ согласуется с теоретическим значением (в предположении нулевой массы ν_e).

Последующие опыты с большей точностью подтвердили этот результат. Существование нейтрино стало экспериментальным фактом. В физике появилась новая частица, все свойства которой были определены из косвенных экспериментов.

Прямое обнаружение свободного нейтрино в процессе обратного бета-распада стало возможным после создания мощных ядерных реакторов и больших водородсодержащих сцинтилляционных детекторов. В реакторе в результате бета-распада осколков деления урана испускаются антинейтрино с энергией до 10 МэВ, в среднем 6 частиц на 1 деление. Плотность потока антинейтрино от мощного реактора (число частиц, проходящих за 1 с через площадку в 1 см^2) составляет вблизи реактора около $j_\nu \approx 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Первая попытка прямого детектирования нейтрино (на самом деле электронного антинейтрино $\bar{\nu}_e$, но тогда еще не была известна разница между нейтрино и антинейтрино) впервые была предпринята в 1953 г. в США Ф. Райнесом и К. Коуэном в эксперименте (проект «Полтергейст»), проведенном на Хэнфордском заводе Комиссии по атомной энергии США (рис. 8.7, 8.8). Протонные мишени представляли собой 300 л жидкого сцинтиллятора (сцинтилляционные детекторы были изобретены совсем незадолго до этого, в 1950 г.), в котором была растворена соль кадмия, сильно поглощающего нейтроны, образующиеся в результате поглощения нейтрино протоном. Наблюдалось число запаздывающих совпадений пар импульсов, причем первая пара (два гамма-кванта) приписывалась аннигиляции позитрона, а вторая – захвату нейтрона кадмием, с последующим испусканием гамма-квантов (но с другой энергией). Наблюдаемое число отсчетов было равно $0,4 \pm 0,2$ в мин., в согласии с предсказанным количеством. Однако от-

ношение сигнала к полному фону было очень низким (1/20), поэтому результаты можно было считать лишь ориентировочными. Тем не менее хэнфордский эксперимент показал, что проблема обнаружения нейтрино разрешима.

В 1956–1959 гг. после трехлетней доработки детектирующей аппаратуры Райнес и Коуэн повторили эксперимент в лучших условиях на одном из реакторов ядерного комплекса «Саванна-Ривер» в штате Южная Каролина. Регистрировалась та же реакция взаимодействия антинейтрино с протоном из водорода, входящего в состав мишени из обычной воды с добавкой соли кадмия. С помощью окружающих мишень сцинтилляционных детекторов и техники запаздывающих совпадений удалось выделить из фона характерную цепочку событий, вызываемых антинейтрино: позитрон, рождающийся в этой реакции, аннигилирует с электроном, испускает два гамма-кванта, которые производят первую сцинтилляционную вспышку; через 5–10 мкс за ней следует вторая вспышка от гамма-квантов, испущенных ядром кадмия в результате захвата нейтрона, который образовался в реакции и замедлился в воде.

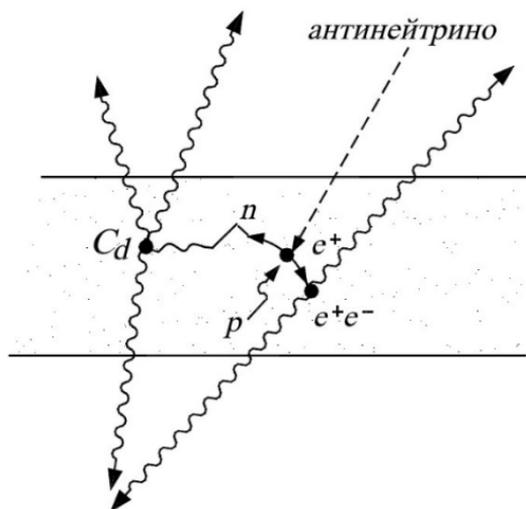


Рис. 8.7. Регистрация антинейтрино Райнесом и Коуэном

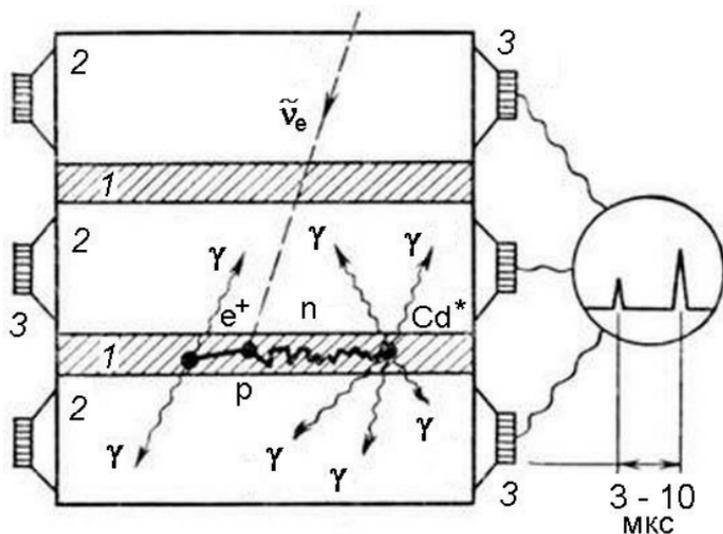


Рис. 8.8. Схема установки Райнеса и Коуэна

Определенные энергии, совпадение по времени, задержка между первым и вторым событием – все эти особенности реакции позволили успешно подавить фон и зарегистрировать нейтрино.

Из эксперимента было получено сечение взаимодействия нейтрино с протоном:

$$\sigma = (11 \pm 2,6) \cdot 10^{-44} \text{ см}^2.$$

Его теоретическая величина (усредненная по спектру антинейтрино) в теории Ферми равна

$$\sigma_{\text{теор}} = (10 \div 14) \cdot 10^{-44} \text{ см}^2.$$

Сечение – это эффективная площадь нуклона для нейтрино, если нейтрино попадает в эту площадку, то оно взаимодействует с нуклоном с вероятностью в 100 % и дает регистрируемые события.

Оценим число таких столкновений в единицу времени при прохождении нейтрино через мишень из воды объемом V . Плотность потока нейтрино от реактора равна $j_\nu = 10^{13} \nu / (\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1})$ (это означает: через единичную площадку в 1 см^2 в каждую секунду проходит 10^{13} нейтрино). Следовательно, через сечение одного ядра $\sigma \approx 10^{-43} \text{ см}^2$ в единицу времени пройдет $j_\nu \sigma = 10^{-30} \nu/\text{с}$, которые дадут наблюдаемые события. Однако в объеме V нейтрино могут встретить $V n_H$ ядер водорода, где n_H – число ядер водорода в единице объема (то есть в 1 см^3), так что число наблюдаемых столкновений нейтрино при объеме мишени V будет равно

$$N_c = j_v n_H \sigma V.$$

Число молекул воды в единице объема определяется из закона Авогадро, который гласит, что один моль вещества содержит определенное число молекул. Это число есть число Авогадро $N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$. Молекулярный вес $H_2O - 2 + 16 = 18$, то есть 1 моль = 18 г. Таким образом, масса воды $M_{\text{воды}} = 18$ г содержит N_A молекул. Значит, в 1 см^3 при плотности воды $\rho_{\text{воды}} = 1 \text{ г/см}^3$ будет содержаться

$$n_{\text{воды}} = N_{A\rho_{\text{воды}}} / M_{\text{воды}} = (1/3) \cdot 10^{23} \text{ молекул воды,}$$

а поскольку каждая молекула воды содержит 2 атома водорода, то число ядер водорода в единице объема будет равно

$$n_H = (2/3) \cdot 10^{23},$$

так что число столкновений нейтрино при полном объеме мишени $V = 400 \text{ л} = 4 \cdot 10^5 \text{ см}^3$ будет равно:

$$N_c \approx 10^{13} \cdot (2/3) \cdot 10^{23} \cdot 10^{-43} \cdot 4 \cdot 10^5 \sim (8/3) \cdot 10^{-2} \text{ событий/с} \sim \\ \sim 2300 \text{ событий/сут.}$$

В эксперименте использовались две водные мишени (см. рис. 8.8) – баки, содержащие по 200 л воды, в которой было растворено 40 кг хлорида кадмия. Каждый из баков был окружен емкостями со сцинтиллирующей жидкостью, каждая из трех емкостей содержала по 110 пятидюймовых фотоумножителей (для регистрации сцинтилляционных вспышек (фотонов) от гамма-квантов в сцинтилляторе).

Весь детектор занимал не более 2 м в любом измерении и был расположен на глубине 12 м, в 11 м от реактора. В те годы этот детектор представлялся фантастически огромным сооружением (большим считался детектор литрового объема). Общая масса установки без внешней свинцовой защиты превышала 10 т, а счет полезных событий (разница счетов при работающем и заглушенном реакторе) составлял $2,88 \pm 0,22$ шт./ч, то есть ~ 70 шт./сут.! Вместе с тем полное число реакций в 400 л воды должно было составить, как мы убедились, более 2 000. 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.

Эти опыты окончательно подтвердили существование свободного нейтрино (рис. 8.9). Фредерик Райнес (1918–1998) в 1995 г. за регистрацию нейтрино получил Нобелевскую премию по физике (Коуэн, его соавтор по открытию, не дожидаясь этого события, он умер в 1974 г.).



Рис. 8.9. Фредерик Райнес и Клайд Коуэн в центре управления хэнфордского эксперимента (проект «Полтергейст», 1953)

Вместе с Райнесом премию получил Мартин Перл за открытие тау-лептона (второго, после мюона, «тяжелого электрона»). Тау-лептон, который тяжелее электрона в 3 477 раз, был им открыт в экспериментах, проведенных в 1974–1977 гг. на стэнфордском линейном ускорителе.

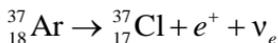
Мюон, который тяжелее электрона в 207 раз, был открыт Карлом Андерсоном (Нобелевская премия по физике 1936 г. за открытие позитрона в 1932 г.) и Сетом Неддермейером в 1938 г. в космических лучах. Каждому из трех «электронов» соответствует свое нейтрино. Таким образом, в природе существуют нейтрино трех типов: электронное, мюонное и тау-лептонное.

8.3.1. Нейтрино и антинейтрино

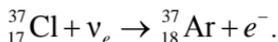
Представление о нейтрино и антинейтрино возникло чисто теоретически из предположения о существовании закона сохранения лептонного числа. Если лептонные числа нейтрино и электрона одинаковы и противоположны лептонным числам позитрона и антинейтрино, то электрон может возникнуть в паре только с антинейтрино, а позитрон – с нейтрино. Однако доказательство того, что эти частицы действительно разные, может быть получено только экспериментально. Поскольку нейтрино не имеет электрического заряда, не исключено, что оно по своим свойствам тождественно антинейтрино, то есть является истинно нейтральной частицей; такое

нейтрино впервые было рассмотрено итальянским физиком Эттори Майораной и поэтому называлось майорановским.

В 1946 г. Бруно Понтекорво (эмигрировавший в 1950 г. в СССР коллега Ферми, итальянский физик) предложил для регистрации нейтрино использовать реакцию превращения ^{37}Cl в ^{37}Ar . Из существования распада



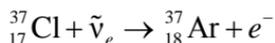
следует реакция



Фиксация «беспричинного» образования атомов аргона в чисто хлорной мишени, облученной потоком нейтрино из реактора, означала бы фиксацию самого нейтрино.

Параллельно с группой Ф. Райнеса поиском нейтрино занялась еще одна группа в США – группа Раймонда Дэвиса. Профессор Р. Дэвис, химик по образованию, начал разработку радиохимического хлор-аргонового метода в начале 50-х гг. И уже в 1955 г. он поставил эксперимент по обнаружению нейтрино в реакции с хлором на реакторе Брукхейвенской национальной лаборатории, а в 1956–1959 гг. продолжил его на более мощном реакторе Национальной лаборатории «Саванна-Ривер» (США).

Однако если нейтрино и антинейтрино не тождественны, то реакция с облучением ^{37}Cl пучком антинейтрино от бета-распадов в реакторе



не должна наблюдаться.

В эксперименте, осуществленном Р. Дэвисом на четыреххлористом углероде, эту реакцию не удалось обнаружить. В 1956 г. Дэвис опубликовал результат: реакция не идет. Следовательно, нейтрино от K -захвата и реакторные нейтрино от бета-распадов различны. Они соотносятся как частица и античастица. Этот результат явился основой для введения сохраняющегося лептонного числа L_e . Начиная с 1968 г. Дэвис начал эксперименты по регистрации солнечных нейтрино (в частности, так называемых борных нейтрино, образующихся в результате β^+ -распада бора-8, который нарабатывается на Солнце в результате цепочки термоядерных реакций). В конечном счете Дэвис не только зарегистрировал эти нейтрино, но и обнаружил их большую нехватку по сравнению с рассчитанной величиной. Это легло в основу последующего замечательного открытия так называемых осцилляций нейтрино (то есть периодического превращения нейтрино одного сорта в другой и связанного с этим нарушения сохранения лептонного числа).

8.3.2. Электронные и мюонные нейтрино

После открытия мюонов, π - и K -мезонов было установлено, что распад этих частиц также сопровождается вылетом нейтрино:

$$\begin{aligned}\mu^{\pm} &\rightarrow e^{\pm} + \nu + \tilde{\nu}, \\ \pi^{\pm} &\rightarrow \mu^{\pm} + \nu(\tilde{\nu}), \\ K^{\pm} &\rightarrow \mu^{\pm} + \nu(\tilde{\nu}).\end{aligned}$$

Поэтому возник вопрос: тождественны ли нейтрино, образующееся при распаде мюонов и мезонов, и нейтрино, образующееся при бета-распаде? Кроме того, имелся ряд процессов, которые по непонятным причинам никогда не происходили. Типичный пример такого ненаблюдаемого процесса – так называемый радиационный распад мюона, то есть испускание мюоном электрона и фотона:

$$\mu^{+} \rightarrow e^{+} + \gamma.$$

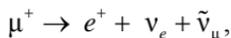
В течение долгого времени физики безуспешно пытались обнаружить этот процесс. Что же запрещает мюону превращаться в электрон и фотон? Для объяснения этого факта можно ввести новый закон сохранения некоего заряда. Например, мы знаем, что нуклоны – протоны и нейтроны – никогда не распадаются только на «легкие частицы». Это позволяет утверждать, что нуклон имеет так называемый барионный заряд, а никакая комбинация легких частиц барионного заряда не имеет. Сразу возникает подозрение, что процессы типа распада мюона на электрон и фотон, которые можно ожидать теоретически, но которые в действительности не происходят, запрещены законом сохранения, скажем, «мюонного» заряда, характерного для мюона, но не для электрона (напомним, что фотон – истинно нейтральная частица, он совпадает с антифотоном и не имеет никаких зарядов).

Однако имеется другой процесс: распад мюона, в котором мюон и электрон участвуют совместно. Такой процесс состоит в испускании мюоном электрона вместе с двумя разными частицами ничтожно малой массы, о чем свидетельствуют экспериментальные исследования формы спектра электронов в этом процессе. На этом основании первоначально считали, что μ^{+} -распад идет по схеме

$$\mu^{+} \rightarrow e^{+} + \nu + \tilde{\nu}.$$

Но такая схема трудносовместима с предположением о существовании мюонного числа, запрещающего переход мюона в электрон и фотон. Ведь пара, по определению частицы и античастицы, не имеет никаких зарядов, как и фотон, так что в описанной схеме мюонный заряд, если он существует, не сохраняется.

Тогда можно предположить, что имеются два сорта пар «нейтрино – антинейтрино»: мюонные и электронные. При этом они отличаются друг от друга тем, что у мюонных нейтрино ν_μ (но не у электронных ν_e) имеется мюонный заряд. В этом случае распад мюона может идти по схеме



где происходит сохранение как мюонного, так и электронного заряда, поскольку разница зарядов мюона и электрона компенсируется разницей зарядов испускаемых нейтрино.

Такое предположение в 1957 г. высказали М. А. Марков, Ю. Швингер и К. Нишиджима. Они предположили, что нейтрино, рождающееся в паре с мюоном (ν_μ), отлично от нейтрино, рождающегося в паре с электроном (ν_e). Возможность проверки этих свойств нейтрино с помощью ускорителей высокой энергии рассматривалась в СССР М. А. Марковым и Бруно Понтеркорво.

Однако, поскольку в то время таких ускорителей в СССР не было, первые успешные опыты были осуществлены Л. Ледерманом, М. Шварцем и Дж. Стейнбергером в 1962 г. на брукхейвенском ускорителе в США (рис. 8.10).

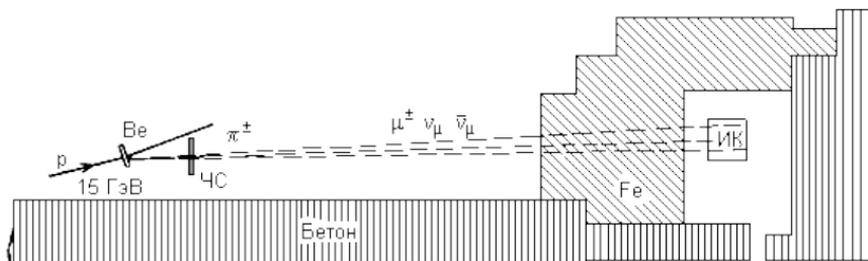


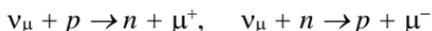
Рис. 8.10. Схема получения нейтринного пучка на ускорителе протонов в эксперименте Л. Ледермана и др.

Одним из главных достижений этой работы было создание нейтринного пучка на этом ускорителе. Мюонные нейтрино образовывались в результате распадов вторичных π^+ - и π^- -мезонов, которые в большом количестве получались в результате взаимодействия пучка протонов с энергией 15 ГэВ с бериллиевой мишенью. Информация об образовании π^+ - и π^- -мезонов поступала со специального черенковского (основанного на эффекте Вавилова – Черенкова излучения фотонов частицами, движущимися со скоростями, большими, чем скорость света в преломляющей среде) счетчика. Вылетев из мишени и распадаясь на лету в специальном пролетном туннеле, мезоны излучали нейтрино и мюоны высоких энергий: $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$.

Дальше пучок попадал в слой стали общей толщиной около 13 м, где практически все частицы, кроме нейтрино, поглощались. Причем из-за большой энергии протонов как вторичные π -мезоны, так и нейтрино от их распада летят преимущественно вперед по направлению первичного пучка протонов.

На пролетной базе ($l = 20$ м) между черенковским счетчиком и железной защитной стеной происходил распад π -мезонов. Все частицы, кроме нейтрино, поглощались в защитной стене. Интенсивность адронов уменьшалась примерно на 20 порядков. Взаимодействия ν_μ и $\bar{\nu}_\mu$ с нейтронами и протонами регистрировались в детекторе, состоящем из набора искровых камер, каждая из которых состояла из 9 алюминиевых пластин размером $\sim 110 \times 110$ см и толщиной 2,5 см. Зазор между пластинами составлял ~ 1 см. Между искровыми камерами располагались сцинтилляционные счетчики, регистрирующие появление заряженной частицы в детекторе. При появлении в детекторе заряженной частицы подавался импульс высокого напряжения на искровые камеры. Тип заряженной частицы (мюон или электрон) определялся по характеру искрового пробоя.

Общая масса нейтринного детектора составляла около 10 т. В результате этих экспериментов было показано, что при взаимодействии образующихся в распаде π -мезонов нейтрино с протонами и нейтронами наблюдались только мюоны и не было обнаружено ни одного случая образования электронов и позитронов, то есть происходят только реакции



с образованием электрона или позитрона. Реакций



найдено не было. Это означает, что нейтрино, образовавшиеся в паре с мюоном, отличаются от электронных нейтрино: они не рождают электроны или позитроны. Таким образом, было доказано существование двух разных нейтрино: мюонного ν_μ и электронного ν_e . Эти результаты были подтверждены в 1964 г. в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН, Женева).

В 1988 г. Леон Ледерман, Мелвин Шварц и Джек Стейнбергер получили Нобелевскую премию по физике за создание метода нейтринных пучков и демонстрацию двойственной структуры лептонов в результате открытия мюонного нейтрино.

В 1964–1967 гг. в аналогичных опытах было установлено, что ν_μ при столкновении с ядрами рождает μ^- , но не μ^+ , то есть мюонные нейтрино ν_μ и антинейтрино $\bar{\nu}_\mu$ также не тождественны, следовательно, кроме L_e необходимо ввести еще одно лептонное число: L_μ .

8.3.3. Поколения лептонов

В настоящее время установлено существование трех поколений лептонов:

- первое поколение – электрон, электронное нейтрино;
- второе поколение – мюон, мюонное нейтрино;
- третье поколение – тау-лептон, тау-нейтрино

(плюс соответствующие античастицы). Таким образом, в каждое поколение входит отрицательно заряженный (с зарядом $-1e$) лептон, положительно заряженный (с зарядом $+1e$) антилептон и нейтральные нейтрино и антинейтрино. Все они обладают ненулевой массой, хотя масса нейтрино весьма мала по сравнению с массами других элементарных частиц (менее 1 эВ для электронного нейтрино).

Характеристики лептонов приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Три поколения лептонов и их свойства

Символ	Название	Заряд	Масса
Первое поколение			
e^-	электрон	-1	0,510998910(13) МэВ/ c^2
ν_e	электронное нейтрино	0	< 2 эВ/ c^2
Второе поколение			
μ^-	мюон	-1	105,6583668(38) МэВ/ c^2
ν_μ	мюонное нейтрино	0	< 0,19 МэВ/ c^2
Третье поколение			
τ^-	тау-лептон	-1	1 776,84(17) МэВ/ c^2
ν_τ	тау-нейтрино	0	< 18,2 МэВ/ c^2

8.4. Симметрии и законы сохранения

В 1915 г. немецкий математик Эмми Нётер чисто математически доказала, что все законы сохранения связаны с симметриями природы. Другими словами, любому преобразованию (из некоторой группы, обладающей определенными свойствами), оставляющему законы природы (то есть уравнения движения) неизменными, соответствует сохраняющаяся величина.

Например, симметрии (то есть независимости) законов природы относительно переноса (трансляции) начала отсчета вдоль некоторой оси (например, x) соответствует сохранение компоненты импульса вдоль этой оси (в данном случае p_x).

Симметрия относительно поворота вокруг некоторой оси приводит к закону сохранения проекции момента импульса на эту ось. На равноправии моментов времени (то есть на симметрии относительно переноса начала отсчета времени) покоится закон сохранения энергии.

Это было выдающееся открытие. Автором открытия была первая женщина, избранная в 1919 г. приват-доцентом Геттингенского университета, а затем в 1922 г. – профессором. Своему избранию Эмми Нётер обязана настойчивости своего учителя, великого Гильберта. Стала известна его фраза: «Не понимаю, почему пол кандидата служит доводом против избрания ее приват-доцентом. Ведь здесь университет, а не мужская баня!»

С созданием квантовой механики для правильного описания свойств и поведения частиц пришлось ввести новые степени свободы, то есть новые переменные, такие как спин, изотопический спин и др.

Появились новые возможные преобразования, и возросло число соответствующих симметрий. Эта теорема стала одной из наиболее важных в квантовой механике и физике элементарных частиц для описания структуры взаимодействий. Взаимодействия стали различать по их симметрии относительно разных преобразований.



Амалия Эмми Нётер (*Amalie Emmy Noether*; 1882–1935) – выдающийся немецкий математик, «самая крупная женщина-математик, когда-либо существовавшая» – так о ней отозвался друживший с ней известный советский ученый-математик П. С. Александров в статье «Памяти Эмми Нётер», опубликованной в журнале «Успехи математических наук», вып. 2, в 1936 г. На протяжении 10 лет она сотрудничала с математиками СССР; в 1928/29 учебном году читала лекции в Московском университете.

Кроме преобразований, которые определяются параметром, принимающим непрерывный ряд значений (например, угол поворота, смещение в пространстве или во времени), имеются еще так называемые дискретные преобразования. К ним относятся операция обращения движения (когда все движения меняются на противоположные, что эквивалентно изменению знака времени), инверсии координат (или зеркального отражения), а также операция замены частиц античастицами. В отличие от смещений и поворотов, они не могут быть получены непрерывным образом из тождественного преобразования (то есть не существует соответствующих бесконечно малых преобразований).

Заметим, что законы Ньютона инвариантны как относительно замены знака времени, так и зеркального отражения (понятия частиц и античастиц появляются только в релятивистской квантовой механике). Если мы снимем на киноплёнку какой-нибудь механический процесс, например движение планеты вокруг Солнца или нескольких молекул в сосуде, и прокрутим киноплёнку в прямом и обратном направлениях, то различия не заметим, оба процесса будут вполне реальны, и никакой из них ничем не выделен, а следовательно, не выделено и направление времени. Точно так же, если посмотрим на эти процессы в зеркале, то увидим и реальные процессы, подчиняющиеся тем же законам. Каждому, кто занимался фотографией, хорошо известно, что «перевернутый» негатив дает после напечатания снимок, который ничем не отличается от «нормального». Заметить ошибку можно только в том случае, если в поле зрения попала какая-нибудь надпись. Тогда сразу ясно, что негатив был перевернут. Дело в том, что природа зеркально симметрична, она «не знает» различия между правым и левым.

Тем не менее в этом симметричном мире несимметричность уцелела и продолжает играть весьма важную роль. Правда, все симметричное в природе считалось отражением фундаментальных качеств мира, а несимметричное – игрой случая. Поглядим на себя в зеркало. Лицо, глядящее «оттуда», – это не вы. Вы слегка щурите правый глаз, а он – левый, нос его слегка прогнут, как и ваш, но в другую сторону; кроме того, человек из Зазеркалья, в отличие от вас, левша, а сердце у него с правой стороны. Откуда взялась такая асимметрия? На этот счет много разных теорий, но, скорее всего, это связано с тем, что Земля вращается в определенную сторону, поэтому симметрия и нарушается. Возможно, на далекой планете как раз все наоборот, то есть в целом природа зеркально симметрична. Такая точка зрения господствовала до 1957 г., пока мадам Ву не провела свой знаменитый эксперимент по изучению бета-распада поляризованных ядер кобальта. И что же?.. Это действительно было величайшей неожиданностью для всех физиков. Вдруг оказалось, что природа знает, где у нее правая сторона. Летом 1956 г. был обнаружен процесс, при котором нарушалась зеркальная симметрия мира.

Ву Цзянь Сюн (*Wu Chien-Shiung*; 1912–1997; также известна как **мадам Ву**) – американский радиофизик китайского происхождения. Участвовала в Манхэттенском проекте (обогащение уранового топлива), поставила (по предложению Янга Чжэньнина и Ли Чжэндао) знаменитый «эксперимент Ву», доказавший нарушение зеркальной симметрии в слабых взаимодействиях. Позднее Янг и Ли были удостоены Нобелевской премии по физике. Ву осталась без награды, что было воспринято многими как проявление дискриминации по отношению к женщинам.



8.4.1. Нарушение зеркальной симметрии

Определим точнее понятие инвариантности по отношению к инверсии координат (зеркальной симметрии).

Заметим сначала, что инверсия пространственных координат (переход к новым координатам $x' = -x$, $y' = -y$, $z' = -z$) эквивалентна изменению знака одной из координат (то есть зеркальному отражению относительно плоскости, ей перпендикулярной) и повороту на 180° относительно этой оси (рис. 8.11). Поэтому инвариантность относительно инверсии координат эквивалентна инвариантности относительно зеркального отражения в силу

изотропности пространства (то есть инвариантности относительно поворота на любой угол).

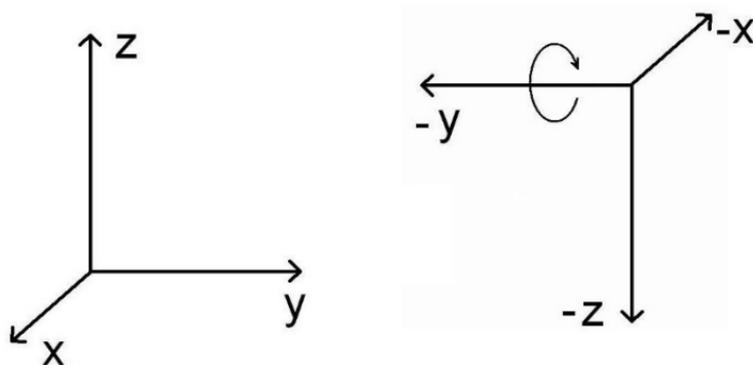


Рис. 8.11. Инверсия координат – это отражение от зеркала в плоскости (x, z) и затем поворот на 180° вокруг оси y

Под инвариантностью относительно какого-либо преобразования понимают следующее: если в природе (то есть нашем мире) существует некоторое явление (или процесс), то должен существовать и его двойник – явление, к которому мы придем в результате преобразования.

Точно так же инвариантность законов природы относительно пространственной инверсии (P -инвариантность) означает, что если мы имеем некоторый существующий физический процесс или свойство реального объекта, то в результате зеркального отражения придем также к существующему процессу или свойству реального объекта. Причем обе «реальности» – «первоначальная» и «зеркальная» – должны быть равновероятны, то есть одинаково часто встречаться в природе.

Например, рассмотрим движение свободной частицы со спином (электрона, нейтрона или гамма-кванта). Направление спина частицы определяется осью ее вращения и правилом буравчика, то есть если перед нами вращается частица по часовой стрелке, то ее спин направлен от нас. Пусть спин частицы параллелен направлению движения (как у правого винта, рис. 8.12).

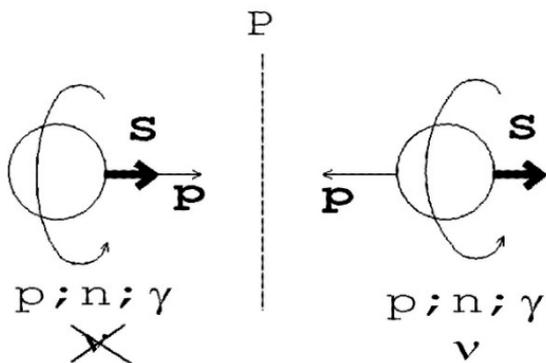


Рис. 8.12. Зеркально-инвариантные процессы распространения нейтрона, протона и фотона со спинами, параллельными либо антипараллельными импульсу. Процесс распространения нейтрино нарушает зеркальную инвариантность, поскольку нейтрино со спином, параллельным импульсу, не существует

Зеркальное отражение (в плоскости, перпендикулярной импульсу) преобразует направление движения частицы на обратное и никак не изменяет направление вращения – ориентацию спина (когда мы идем навстречу зеркалу, наш зеркальный двойник идет нам навстречу, то есть импульс в зеркале меняет знак, а направление вращения остается неизменным). Частица в зеркале движется в противоположную сторону, а вращается в первоначальном направлении, то есть в зеркале правый винт превращается в левый. В физике так и говорят: правовинтовая частица в результате зеркального отражения превращается в левовинтовую. Такие «зеркальные» частицы также существуют в природе, причем «левые» и «правые» электроны, нейтроны, гамма-кванты и большинство других частиц встречаются одинаково часто. Следовательно, указанные процессы распространения частиц являются P -инвариантными, более того, поскольку мы знаем, что электромагнитные взаимодействия между заряженными частицами осуществляются посредством обмена фотонами, то приведенный пример есть указание на то, что любые электромагнитные процессы инвариантны относительно зеркального отражения.

Свидетельством такой инвариантности является также и тот факт, что мы можем одинаково успешно изготавливать винты (и гайки) как с правой, так и с левой резьбой, поскольку механические свойства материалов определяются именно электромагнитными взаимодействиями.

Примером зеркально-неинвариантного процесса служит распространение нейтрино. В нашем мире, насколько мы знаем сегодня, не встречается нейтрино, спин которого параллелен импульсу. Они всегда антипараллельны (как говорят, *спиральность* нейтрино – проекция спина на импульс –

отрицательна). Нейтрино рождаются при слабых взаимодействиях (ответственных, например, за бета-распад ядер), поэтому можно считать, что слабые взаимодействия устроены так, что, в отличие от электромагнитных, они «различают», где «право», а где «лево», то есть нарушают зеркальную симметрию.

Спиральность нейтрино была измерена в Брукхейвенской лаборатории группой М. Гольдхабера в 1958 г. Было экспериментально показано, что спиральность нейтрино всегда отрицательна, а спиральность антинейтрино всегда положительна. В природе не наблюдается правополяризованных нейтрино и левополяризованных антинейтрино.

Однако этот эксперимент был выполнен уже после открытия нарушения зеркальной, или P -инвариантности, в бета-распадах поляризованных ядер ^{60}Co группой Ву Цзянь Сюн, которая осуществила эксперимент, предложенный Ли Чжэндао и Янгом Чжэньнином (рис. 8.13) в 1956 г. Оказалось, что электроны предпочитают вылетать в направлении, противоположном направлению ядерного спина (рис. 8.14, 8.15).



Рис. 8.13. Ли Чжэндао и Янг Чжэньнин – нобелевские лауреаты по физике 1957 г.

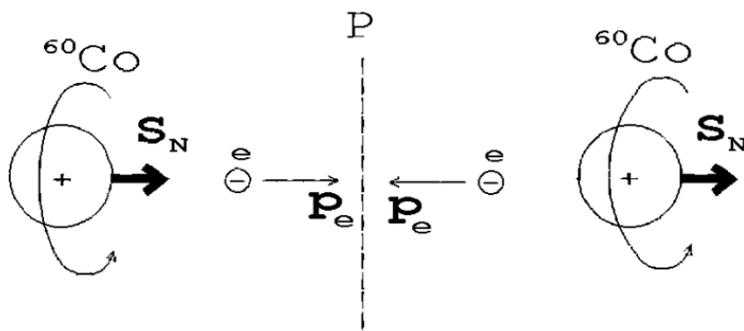


Рис. 8.14. Зеркально-неинвариантный бета-распад ^{60}Co . Если бы была зеркальная симметрия, электроны вылетали бы изотропно (то есть процессы, изображенные *слева* и *справа*, были бы равновероятны)

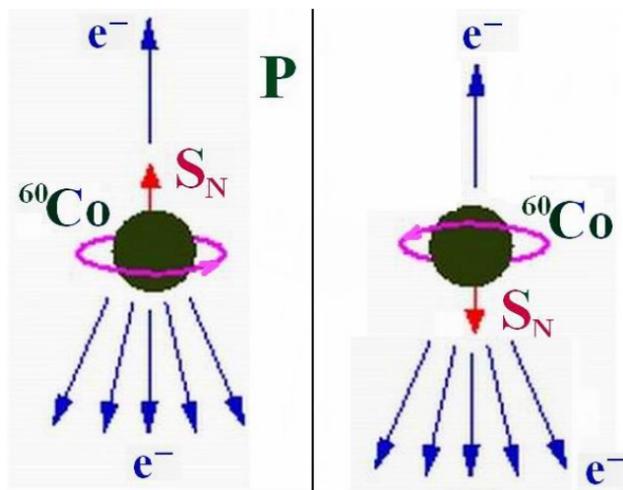


Рис. 8.15. Эксперимент Ву по обнаружению зеркальной асимметрии бета-распада. На этом рисунке плоскость зеркала параллельна импульсу электронов. В таком зеркале направление движения остается прежним, но меняется направление вращения (спина) ядра. Из опыта Ву следует, что электроны предпочитают вылетать против спина ядра, то есть электронов, вылетевших против спина больше, чем по спину. В зеркале же, наоборот, больше электронов вылетает по спину, такого в нашем мире не бывает

Формально это можно записать так: число электронов, вылетающих в заданном направлении $\mathbf{n}_e = \mathbf{p}_e/p_e$, пропорционально величине

$$W_e \sim 1 + A(\mathbf{n}_e \boldsymbol{\sigma}_N) = 1 + A \cos \theta,$$

где \mathbf{n}_e – единичный вектор в направлении вылета (импульса) электрона; $\boldsymbol{\sigma}_N$ – единичный вектор в направлении спина ядра (вектор поляризации); θ – угол между направлением спина ядра и направлением вылета электрона. Из этой формулы следует, что по спину и против спина будет вылетать разное количество электронов, разница же определяется численным значением и знаком величины A , которая носит название корреляционного коэффициента, а величина $(\mathbf{n}_e \boldsymbol{\sigma}_N)$, входящая в выражение для числа испускаемых электронов, определяет так называемую P -нечетную корреляцию (она меняет знак при зеркальном отражении, или при инверсии координат). Поскольку электроны предпочитают вылетать против спина ядра (то есть под углом $\theta = 180^\circ$ вероятность вылета W_e больше, чем при $\theta = 0$), то величина A должна быть отрицательной, так как $\cos \pi = -1$.

Заметим, что векторы, которые изменяют знак при инверсии координат (радиус-вектор, скорость, импульс, ускорение и пр.), называются полярными. Те же, которые знака не изменяют (например, момент количества движения), называются аксиальными, или псевдовекторами.

Фундаментальное открытие зеркальной асимметрии нашего мира могло бы состояться на 30–40 лет раньше, если бы не убежденность в нерушимости право-лево-симметричного мира. Все нужное для опыта оборудование было в распоряжении экспериментаторов еще в 30-е гг. От «пустой» траты времени на проверку удерживали вера в законы симметрии и, может быть, то, что в такую возможность не верили В. Паули («Бог не может быть слаборуким левшой») и Ландау («Мир не может быть таким горбатым»).

Поучителен известный случай, о котором рассказывает Ю. П. Степановский из Харьковского физико-технического института в статье «Нейтринная и рентгеновская астрономия», посвященной Нобелевской премии 2002 г., которая была присуждена за обнаружение космических нейтрино и открытие космических источников рентгеновского излучения. Эта статья опубликована в журнале «Электромагнитные явления» (2003, т. 3, № 2 (10)): «Отсутствие зеркальной симметрии в физике микромира представлялось даже выдающимся физикам совершенно невероятным. Свидетельством этого может служить случай с И. С. Шапиро, который работал в то время в Московском университете. Об этом случае рассказывает Ф. Яноух в своей книге о Л. Д. Ландау. В 1956 г. Шапиро очень активно занимался так называемой *тау-тэта*-проблемой, которая длительное время была мучительной загадкой для физиков, занимающихся элементарными частицами. Суть ее в том, что две, казалось бы, совершенно разные частицы –

τ^+ - и θ^+ -мезон, распадающиеся соответственно на 3 и 2 π -мезона, имеют совпадающие массы и времена жизни. Шапиро пришел к выводу, что это одна и та же частица, и единственное возможное объяснение происходящего – это не сохранение четности при ее распаде. Поскольку этот распад относится к слабым взаимодействиям, Шапиро предсказал и рассчитал некоторые другие явления, которые могут указывать на несохранение четности при бета-распаде, такие, как продольная поляризация электронов, круговая поляризация внутреннего тормозного излучения и асимметрия при бета-распаде поляризованных ядер... Ландау, когда Шапиро показал ему свою статью, высмеял эту идею, – а без святейшего согласия Ландау статья Шапиро не могла быть опубликована. Статья осталась лежать в ящике стола Шапиро, где я и видел ее за много месяцев до того, как Ли и Янг послали в печать их статью. Так, из-за Ландау, советская физика потеряла Нобелевскую премию. Сам Шапиро вспоминал о том, как Ландау отнесся к идее о нарушении зеркальной симметрии в природе. В принципе это возможно, но такой горбатый мир был бы настолько ужасным, что я не хочу и думать об этом, такова была его реакция, и это было концом нашего разговора. Впоследствии, когда Ландау был вынужден признать, что зеркальной симметрии в природе нет, он пытался подправить этот горбатый мир, предположив, что то, что мы видим в зеркале, хотя и не может происходить в нашем мире, но может происходить в антимире, в котором все частицы заменены на античастицы. Но, как было установлено в 1964 г. (Дж. Кронин, В. Фитч, Нобелевская премия по физике 1980 г.), и эта новая симметрия, введенная Ландау, тоже нарушается. Кронин и Фитч обнаружили, что долгоживущие нейтральные K_L^0 -мезоны, которым положено распадаться только на три π -мезона в случае справедливости новой симметрии Ландау, в редких случаях распадаются и на два π -мезона (Кронин и Фитч обнаружили 45 таких запрещенных распадов на 23 000 сфотографированных распадов)».



Иосиф Соломонович Шапиро (1918–1999) – выдающийся советский физик-теоретик, член-корреспондент РАН. Заведующий сектором теоретической ядерной физики ФИАН им. П. Н. Лебедева. Талантливый педагог, блестящий лектор, И. С. Шапиро преподавал в ведущих вузах страны: МГУ, МФТИ, более 20 лет был профессором МИФИ, читал курсы лекций на различных международных школах, им написаны монографии и учебные пособия.

По инициативе И. С. Шапиро и В. М. Галицкого были организованы первые школы МИФИ по теоретической ядерной физике для молодых ученых. Многие активно работающие физики считают себя его учениками.

Для полноты картины и для пояснения того, в каких муках рождаются новые идеи, можно привести комментарий самого И. С. Шапиро по поводу этой неопубликованной, но доложенной на семинаре и хорошо известной в мире работы: «Моя работа осталась неопубликованной потому, что я не понимал, каким образом в евклидовом пространстве возникает физическая асимметрия левого и правого. Разумеется, об оптически активных средах я размышлял, но там наряду с левым изомером всегда существовал и правый, в случае же частиц ничего подобного известно не было. С другой стороны, в безошибочности моих конкретных расчетов я был совершенно уверен – они были просты, а их результаты – физически прозрачны. Добавлю к сказанному, что в объяснение «tau-teta-загадки» существованием вырожденной по четности пары частиц я с самого начала не верил. Все эти сомнения были довольно мучительны, и они-то и удерживали меня от направления статьи в журнал. Ландау здесь абсолютно ни при чем. Конечно, если бы ему идея понравилась, я бы, вероятно, опубликовал статью, несмотря на все свои сомнения, которые можно было бы специально оговорить. Но работа не была напечатана не потому, что кто-то помешал, а потому, что я сам не был до конца убежден в ее физической правомерности».

И вот под напором эксперимента принцип симметрии рухнул в одном из прочнейших звеньев! Более того, физики получили в руки новый инструмент исследования слабого взаимодействия. Благодаря такой асимметрии удалось выделять эти слабые взаимодействия на фоне электромагнитных и даже сильных взаимодействий, о чем раньше не приходилось даже мечтать.

Лев Давидович Ландау (1908–1968) – выдающийся советский физик-теоретик, академик АН СССР (избран в 1946 г.).

Лауреат Нобелевской премии по физике 1962 г., медали имени Макса Планка, Ленинской и трех Сталинских премий, Герой Социалистического Труда. Член Лондонского королевского общества и академий наук Дании, Нидерландов, США (Национальной академии наук США и Американской академии искусств и наук), Французского физического общества и Лондонского физического общества.

Инициатор создания и соавтор курса теоретической физики, выдержавшего многократные издания и переведенного на многие языки.

Именем Ландау названа золотая медаль, вручающаяся с 1998 г. Отделением ядерной физики РАН. Также именем Ландау назван Институт теоретической физики РАН.



8.4.2. Универсальность слабых взаимодействий.

Нарушение зеркальной инвариантности в сильных взаимодействиях

Возник вопрос: а может ли быть, скажем, такой процесс прямого слабого рассеяния нуклона на нуклоне (рис. 8.16) и можно ли его увидеть (то есть выделить) на фоне сильного взаимодействия? Ведь мы помним, что эффективное сечение нуклона для слабого взаимодействия – на уровне 10^{-43} см², а для сильного оно определяется просто радиусом нуклона, то есть $\sim 10^{-24}$ см². Имеет ли вообще смысл ставить такой эксперимент? Например, бессмысленно измерять расстояние между поверхностями Луны и Земли (~ 370 тыс. км = $3,7 \cdot 10^{10}$ см) с точностью $\sim 10^{-10}$ см, то есть с точностью в сотые доли размера атома. Ведь любая малая шероховатость поверхности, даже песчинка или рябь на воде высотой $\sim 0,1$ мм, выделяется над ровной поверхностью на 10^6 атомов.

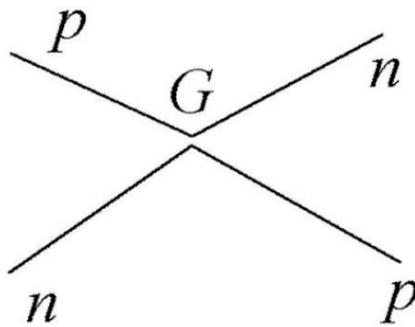


Рис. 8.16. Прямое слабое столкновение нейтрона с протоном

Оказалось, что, несмотря на громадную разницу в сечениях, такое взаимодействие можно выделить благодаря тому, что оно нарушает зеркальную инвариантность, в отличие от сильных и электромагнитных взаимодействий.

После открытия нарушения зеркальной инвариантности в слабых взаимодействиях стали ее искать и в сильных (например, при столкновении протона с нейтроном). Тем более что из существования бета-распада уже следует, что к сильному взаимодействию между нуклонами должно примешиваться слабое из-за процессов типа изображенного ниже на рис. 8.17: протон распадается (на время, определяемое принципом неопределенности) на нейтрино и позитрон, а нейтрон их поглощает, превращаясь в протон. Заметим, что именно этот процесс рассматривался в 1934 г. Таммом и Иваненко как новый возможный тип взаимодействия между нуклонами за счет обмена массивными частицами.

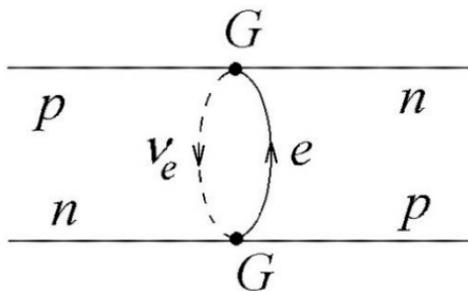


Рис. 8.17. Слабое взаимодействие нейтрона с протоном за счет обмена позитрон-нейтринной (электрон-антинейтринной) парой

Однако вероятность такого процесса ничтожно мала. Она пропорциональна четвертой степени слабой константы G^4 , поскольку очень малая

доля (пропорциональная G^2) протонов распадается, и такая же доля ($\sim G^2$) от этой доли поглощается нейтроном, и экспериментально обнаружить такой эффект невозможно. Однако если слабое взаимодействие универсально, то почему бы не быть процессу, изображенному на рис. 8.15. Тогда его вероятность была бы существенно больше. Можно показать, что примесь такого взаимодействия к сильному привела бы к наблюдаемым эффектам на уровне $\sim 10^{-7}$. Что это за эффекты и как их заметить?

А это опять же эффекты нарушения зеркальной инвариантности, например эффект появления циркулярной поляризации гамма-квантов в электромагнитных переходах неполяризованных ядер (возбуждаемых, например, неполяризованными нейтронами). Действительно, этот эффект нарушает зеркальную инвариантность (рис. 8.18). Циркулярная поляризация кванта означает, что направление вектора напряженности электрического поля в соответствующей электромагнитной волне вращается либо по часовой стрелке, либо против нее – правая, либо левая циркулярная поляризация, в зависимости от знака проекции направления вращения на направление импульса кванта. Отражение в зеркале приводит к изменению знака циркулярной поляризации. Инвариантность относительно зеркального отражения требует отсутствия циркулярной поляризации гамма-квантов от неполяризованных источников.

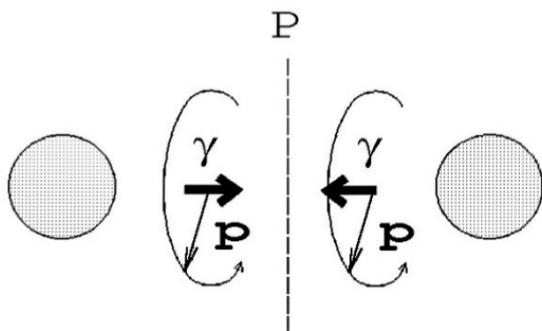


Рис. 8.18. Циркулярная поляризация гамма-квантов, излучаемых неполяризованными ядрами, означает различную вероятность «прямого» и «зеркального» процессов, то есть нарушение P -инвариантности

Именно эксперименты по обнаружению циркулярной поляризации гамма-излучения ядер, возбуждаемых неполяризованными нейтронами (такие реакции называются (n, γ) -реакциями), позволили окончательно установить наличие слабого взаимодействия между нуклонами в ядре и подтвердить универсальность слабого взаимодействия. Только примесь слабого вза-

имедействия между нуклонами может привести к такому нарушению P -инвариантности, поскольку все остальные взаимодействия в ядре P -инвариантны.

Эти эксперименты были выполнены на реакторе ВВР-М в Гатчине группой В. М. Лобашева и опубликованы в 1967 г. (исследовались гамма-переходы с уровня 482 кэВ в ^{181}Ta и с уровня 396 кэВ в ^{175}Lu). Измеренные величины циркулярной поляризации гамма-квантов оказались равными $P_\gamma = -(6,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-6}$ для ^{181}Ta и $P_\gamma = +(4,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-5}$ для ^{175}Lu .

Данные работы по поиску циркулярной поляризации гамма-излучения были инициированы публикацией в 1964 г. группы Ю. Г. Абова (ИТЭФ, Москва), сообщившей о наблюдении асимметрии вылета гамма-квантов (по и против спина ядра) при захвате поляризованных нейтронов ядром ^{113}Cd (аналог эксперимента Ву, но с гамма-квантами), и работой Ф. Бозма и Е. Канкелейта (вышедшей в начале 1965 г.), обнаруживших циркулярную поляризацию гамма-квантов в распаде неполяризованных ядер ^{181}Ta . Оба эффекта свидетельствовали о нарушении P -четности в ядерных электромагнитных переходах и интерпретировались как проявление слабого нуклон-нуклонного взаимодействия в ядрах, изображенного на рис. 8.16.

Однако первые же эксперименты с гамма-лучами ^{181}Ta группы Лобашева показали, что результат, опубликованный Бозмом и Канкелейтом, просто неверен: в последующих экспериментах циркулярная поляризация гамма-квантов ^{181}Ta была обнаружена на уровне в 30 раз меньшем, чем у Бозма. По сути дела, именно эксперименты группы Лобашева поставили точку в вопросе о доказательстве существования слабого нуклон-нуклонного взаимодействия (результаты вскоре были подтверждены в ряде других лабораторий мира, в то время как пионерские данные группы Абова не удалось воспроизвести другим исследователям в течение восьми лет, хотя сами авторы еще дважды их подтверждали). В 1974 г. Ю. Г. Абов, П. А. Крупчицкий (ИТЭФ), а также В. М. Лобашев и В. А. Назаренко (ПИЯФ) были удостоены Ленинской премии «за обнаружение и исследование эффектов нарушения пространственной четности в ядерных электромагнитных переходах».

8.4.3. Смешивание кварков. Схема Кабиббо. Второе поколение кварков

Как мы уже говорили, нейтральный нейтрон состоит из трех кварков (udd) – одного верхнего u -кварка с зарядом $+2/3$ и двух нижних d -кварков с зарядами $-1/3$. Положительно заряженный протон с зарядом $+1$ состоит из одного нижнего d - и двух верхних u -кварков: (uud). Таким образом, бета-распад нейтрона происходит в результате превращения одного из нижних кварков в верхний с испусканием электрона и антинейтрино (рис. 8.19).

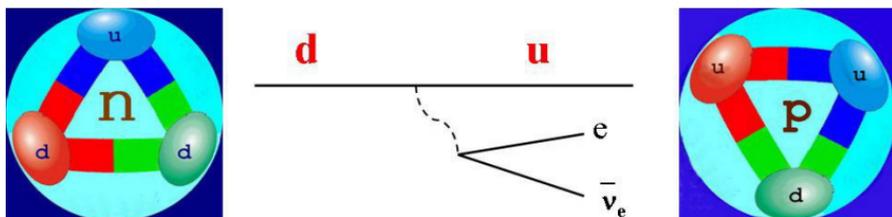


Рис. 8.19. Бета-распад нейтрона обусловлен бета-распадом d -кварка

Универсальность слабого взаимодействия означает, что процессы бета-распада мюона и нейтрона должны описываться одной и той же константой (рис. 8.20), то есть константы G_F и G_V должны совпадать: $G_F = G_V = G$.



Рис. 8.20. Если слабое взаимодействие универсально, то, казалось бы, распады мюона и нейтрона должны описываться одной константой

Однако нейтрон преподнес очередной сюрприз: из более точных измерений времен жизни оказалось, что константы распадов мюона и нейтрона (то есть d -кварка) слегка (на $\sim 2\%$) отличаются, причем $G_V < G_F$.

Еще оказалось, что слабые взаимодействия нарушают закон сохранения странности, который справедлив для сильных взаимодействий (то есть имеется еще одна симметрия сильных взаимодействий, которую, как и зеркальную, нарушают слабые взаимодействия). Более того, для странных частиц (то есть содержащих странный кварк), например Λ -гиперона (рис. 8.21), константа распада с изменением странности на единицу $\Delta S = 1$ оказалась почти в 5 раз меньше, причем для таких распадов всегда изменение странности равно изменению заряда $\Delta S = \Delta Q$. Это означает, что s -кварк с зарядом $Q = -1/3$ и странностью $S = 1$ может распадаться только на u -кварк с зарядом $Q = 2/3$ и странностью $S = 0$.

Таким образом, s - и d -кварки переходят в u -кварк, но с разными константами. Универсальность слабого взаимодействия оказалась под вопросом.

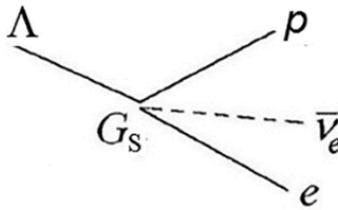


Рис. 8.21. Константа G_S распада Λ -гиперона, содержащего s -кварк вместо одного из d -кварков, приблизительно в 5 раз меньше константы Ферми

Эlegantный выход из положения нашел Кабиббо в 1963 г. Он предположил, что слабое взаимодействие кварков и лептонов описывается той же константой G_F , но в адронах (то есть составных системах) к d -кварку примешивается небольшая доля s -кварка и, наоборот, к s -кварку примешивается небольшая доля d -кварка. Для объяснения экспериментальных данных нужно предположить, что слабые взаимодействия слегка меняют строение кварков внутри адронов. В слабых взаимодействиях участвует d' -кварк (а не d -кварк), который состоит на $\sim 95\%$ из d -кварка и на 5% из s -кварка, но распасться на u -кварк может лишь d -кварк, но не s -кварк. Поэтому распад нейтрона слегка замедляется на величину примеси s -кварка. Точно так же s' -кварк состоит на $\sim 95\%$ из s -кварка и на 5% из d -кварка, но распасться может только d -кварк, которого всего 5% , поэтому и живут такие странные частицы значительно дольше по сравнению с обычными.

Возник вопрос: а нет ли пары и для s -кварка, то есть нет ли еще одного верхнего кварка (четвертого) с зарядом $2/3$, на который мог бы распасться s -кварк (или, наоборот, который сам бы распадался на s -кварк)? Многие авторы уже в 1964 г. предложили ввести четвертый кварк. У этого кварка странность должна быть равной нулю и новое квантовое число – очарование – равно единице. Кварк с такими свойствами назвали очарованным, или c -кварком.

Появление нового кварка означает, что существует семейство новых частиц, имеющих в своем составе c -кварк. Такие частицы были открыты в 1974 г. почти одновременно (статьи поступили в редакцию журнала 12, 13 и 18 ноября соответственно) двумя группами на ускорителях Брукхейвена и Стэнфорда (США), затем открытие было подтверждено во Фраскати (Италия). Это знаменитые J/ψ -частицы с большой массой ($m = 3\,096,87 \pm \pm 0,04$ МэВ). Уже через две недели была обнаружена еще одна частица с массой около $3,7$ ГэВ. Оказалось, что эти новые частицы представляют собой возбужденные состояния так называемого чармония (по аналогии с позитронием) – связанной системы очарованных кварка и антикварка (система со скрытым очарованием, поскольку ее суммарное очарование $C = 0$).

В 1976 г. «за пионерские работы по открытию тяжелых элементарных частиц нового типа» Бертон Рихтер (Стэнфорд) и Самюэль Тинг (Брукхейвен) были удостоены Нобелевской премии. Сейчас известно около десятка таких возбужденных состояний ($c\tilde{c}$ -мезонов), а также множество очарованных ($C \neq 0$) мезонов и барионов. Таким образом, к 1975 г. мир представлялся физикам следующим образом: имеются два поколения частиц – «электронное» (e, ν_e, u, d) и «мюонное» (μ, ν_μ, c, s). Из частиц первого поколения построены атомы, то есть мы сами и окружающее нас вещество.

Заметим, что распад странного кварка в очарованный не мог наблюдаться, потому что масса очарованного кварка больше массы странных частиц.

8.4.4. Три поколения кварков и лептонов

В 1975 г. в опытах на встречных пучках в Стэнфорде группой М. Перла был обнаружен третий, самый тяжелый в семействе лептонов, τ -лептон с массой $(1777,0 \pm 0,3)$ МэВ и временем жизни $\tau = (291 \pm 1) \cdot 10^{-15}$ с. Исследованы его распады:

$$\tau^\pm \rightarrow l^\pm + \nu_l + \nu_\tau, \quad \tau^\pm \rightarrow h^\pm + \nu_\tau$$

и др., где l – известные нам лептоны e и μ , а h – мезоны π и K .

Естественно было предположить, что существует третье – « τ -лептонное» поколение кварков, в котором имеются новые аналоги верхнего и нижнего кварков с зарядами $2/3$ и $-1/3$ соответственно. Их назвали top и bottom – t - и b -кварками. Они имеют и другие названия: true – «истинный» и beauty – «прелестный» кварки. В 1977 г. группа Л. Ледермана обнаружила новое необычное семейство так называемых ипсилон-частиц – Y с весьма большими массами ($m_{Y^+} \approx 9,4$ ГэВ, $m_{Y^0} \approx 10$ ГэВ, $m_{Y^-} \approx 10,4$ ГэВ). Оказалось, что эти частицы, аналогично чармонию, представляют собой возбужденные состояния связанной системы «прелестных» кварков $b\tilde{b}$, то есть системы со скрытой «прелестью». В 1995 г., то есть почти через 20 лет после открытия b -кварка, в Фермилабе (Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми, США) был экспериментально обнаружен шестой и последний из кварков – t -кварк. Его масса неожиданно оказалась очень большой: современное значение, полученное исследователями, равно $174,3 \pm 5,1$ ГэВ, что порядка массы атома самого тяжелого из лантаноидов – лутеция. Таким образом, продолжая аналогию с миром, состоящим из двух поколений кварков, можно думать, что все нижние кварки смешиваются (схема Кабиббо – Кабаши – Маскава, рис. 8.22).

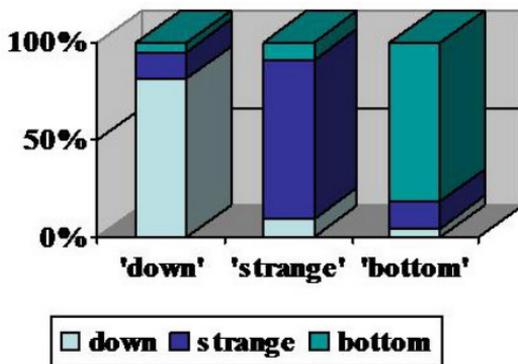


Рис. 8.22. Смешивание нижних кварков трех поколений

Сравнивая времена жизни частиц, состоящих из различного типа кварков, можно определить концентрацию примесей («кварковый состав») в каждом из «штрихованных» кварков. Сумма концентраций всех типов кварков в каждом из «штрихованных» должна быть равна 100 % (так называемое условие унитарности). Таким образом, складывая концентрации различных типов кварков, полученные из разных экспериментов, мы будем иметь информацию о числе поколений. Если число поколений больше трех, мы получим суммарную концентрацию меньше 100 %. В настоящее время экспериментальные данные свидетельствуют о том, что условие унитарности выполняется, следовательно, число поколений кварков равно трем.

8.4.5. Ультрахолодные нейтроны и время жизни нейтрона

Измерение времени жизни нейтрона дает самый точный метод определения относительного содержания d -кварка в d' -кварке (то есть и в нейтроне). Соответственно, отличие от 100 % дает суммарное содержание s - и b -кварков.

В 2004 г. нейтрон преподнес очередной сюрприз. Российскими учеными (руководитель эксперимента А. П. Серебров, ПИЯФ РАН) на созданной совместно ПИЯФ и ОИЯИ установке, на пучке так называемых ультрахолодных нейтронов (УХН) реактора международного Института им. Лауэ – Ланжевена (ИЛЛ) в Гренобле (Франция), было измерено время жизни нейтрона с рекордной точностью ($\tau_n = 878,5 \pm 0,9$ с).

Ультрахолодные – это такие нейтроны, которые из-за своей малой кинетической энергии не могут попасть внутрь вещества, они от него отражаются. Точно так же как мяч, катящийся по поверхности со скоростью v , не может преодолеть горку с высотой больше чем $h = v^2/2g$, он поднимется

только на эту высоту, а затем скатится назад – «отразится» от потенциального (гравитационного) барьера, которым является эта горка. Для нейтрона обычное вещество и является таким потенциальным барьером, только возникает этот барьер из-за сильного взаимодействия нейтронов с ядрами вещества. Но, поскольку ядра в веществе находятся на громадных расстояниях друг от друга по сравнению с размерами самих ядер, это сильное взаимодействие усредняется по объему, в котором ядра занимают ничтожно малую часть. В результате высота этого барьера оказывается достаточно малой. Если выразить ее в скорости нейтрона, то для разных веществ она лежит в пределах от 3 до 7 м/с, что соответствует высотам гравитационного барьера (высотам горки) от 0,5 до 2,5 м. Это означает, что нейтроны с такими скоростями не могут проникнуть в вещество. Заметим, что скорости нейтронов при комнатной температуре (как и атомов водорода) порядка 1 км/с, а так как температура определяется кинетической энергией частиц и пропорциональна квадрату скорости, то температура таких нейтронов (со скоростями ~ 10 м/с) в 10 000 раз ниже комнатной, то есть ~ $3 \cdot 10^{-2}$ К. Поэтому они и называются ультрахолодными. А поскольку они отражаются от вещества, их можно хранить в полости или сосуде. В качестве материалов для создания таких «ловушек» используются бериллий, окись бериллия, медь, покрытия твердым кислородом (при низкой температуре), наноалмазные покрытия. Лучшим покрытием (то есть таким, в котором нейтроны меньше всего поглощаются) сейчас является специальное высокомолекулярное масло (фомблин) с молекулярным весом до 4 000 и выше, в котором атомы водорода замещены на атомы фтора.

Существование УХН с указанными выше свойствами предсказано советским ученым Я. Б. Зельдовичем в 1959 г. Впервые экспериментально они были получены в ОИЯИ в 1968 г. на импульсном реакторе ИБР. В 1975 г. это явление было зарегистрировано как открытие, авторами которого стали Я. Б. Зельдович из Института химической физики и сотрудники Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ В. И. Лушиков, Ю. Н. Покотиловский, А. В. Стрелков и Ф. Л. Шапиро. Начиная с середины 70-х гг. в течение десятилетия плотность УХН была максимальной на реакторе ВВР-М в Гатчине (рис. 8. 23), и только с запуском в Институте им. Лауэ – Ланжевена источника УХН на высокопоточном реакторе HFR (с плотностью потока тепловых нейтронов ~ 10^{15} см⁻² · с⁻¹ плотность УХН в Гатчине стала уступать ему приблизительно в 2 раза из-за различия исходных потоков тепловых нейтронов. До сравнительно недавнего времени только в Гренобле и Гатчине имелись достаточно интенсивные источники УХН, на которых были получены рекордные по точности результаты измерения ЭДМ нейтрона и его времени жизни. Сейчас в Петербургском институте ядерной физики в Гатчине под руководством А. П. Сереброва проектируется и создается новый супер-

источник УХН, который на несколько порядков будет превосходить по плотности все существующие источники в мире.

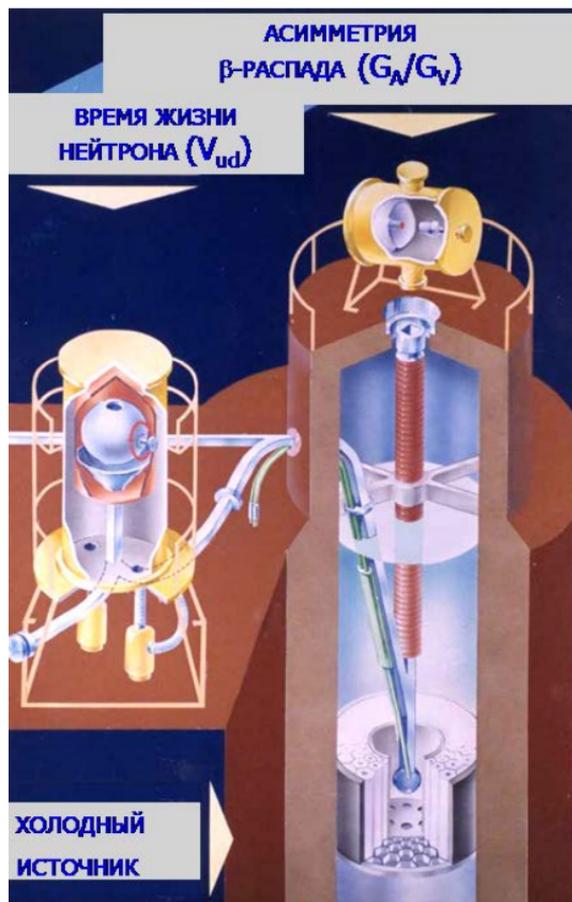


Рис. 8.23. Установки для измерения времени жизни нейтрона, его ЭДМ и корреляционных коэффициентов при бета-распаде на универсальном жидководородном источнике холодных и ультрахолодных нейтронов (справа внизу) на реакторе ВВР-М в Гатчине (рис. А. П. Сереброва – одного из его создателей). По двум изогнутым нейтронпроводам УХН поступали в установки для измерения ЭДМ нейтрона и его времени жизни (нейтроны с энергиями, большими высоты барьера материалов нейтронвода и ловушек, пройдут сквозь их стенки за пределы установок). Слева в сферической полости с отверстием (гравитационной ловушке) накапливались УХН для измерения времени жизни нейтрона. Вверх по прямому поляризирующему нейтронводу в установку для измерения корреляционных коэффициентов поступают холодные поляризованные нейтроны

Итак, в 2004 г. российскими учеными при участии коллег из Института им. Лауэ – Ланжевена на пучке УХН высокопоточного реактора ИЛЛ в Гренобле был получен фундаментальный результат нового измерения времени жизни нейтрона в ловушке УХН, покрытой низкотемпературным фторполимером (фомблином). Он оказался совершенно неожиданным. Время жизни нейтрона получилось на 7,2 с меньше среднего мирового результата и на 6,9 с меньше последнего наиболее точного результата, полученного также российскими учеными из Курчатовского института с коллегами из

ИЛЛ. Это отличие далеко выходит за пределы ошибок измерений (соответственно в 6,5 и 5,6 раза превосходит эти ошибки). Следовательно, какой-то из результатов не верен. Однако в новом эксперименте получено наилучшее приближение времени хранения к времени жизни нейтрона. Эта разница, обусловленная потерями нейтронов при их столкновениях со стенками ловушки, составила всего 5 с (в отличие от 100 с в предыдущем эксперименте), что является основным большим преимуществом по сравнению со всеми предыдущими экспериментами по хранению нейтронов в материальных ловушках. Потери в последнем эксперименте, являющиеся основным источником ошибок, были сведены к минимуму. Тем не менее новый результат был признан не сразу. Понадобилось еще несколько лет, чтобы проверить старые результаты экспериментов, обработать их с учетом появившихся новых экспериментальных данных о потерях нейтронов в ловушках, провести новые измерения, в том числе и новыми методами с использованием магнитных «сосудов» для хранения нейтронов. В последних отсутствуют потери нейтронов, связанные с их ударами о стенки ловушек, которые и являются основным источником ошибки эксперимента.

Сейчас уже доказано, что последнее измерение группы Сереброва является правильным, оно подтверждено другими измерениями, а также обработкой более ранних экспериментов с учетом новых знаний, полученных за последнее время.

После опубликования в 2018 г. последних работ группой ПИЯФ и группой Лос-Аламосской национальной лаборатории (США) новая среднемировая величина времени жизни нейтрона при хранении в магнитных ловушках стала равна $\tau_n = 879,4 \pm 0,6$ с (справочник Particle Data Group – 2018). Заметим, что в справочнике PDG-2010 приведено еще старое значение: $\tau_n = 885,7 \pm 0,8$ с.

Новый результат оказался совершенно неожиданным и очень важным для физики элементарных частиц, астрофизики и космологии, а также для нейтринной физики, поэтому была необходима его проверка другими методами. Одним из таких методов стал метод магнитного хранения УХН.

8.4.6. Магнитная ловушка ультрахолодных нейтронов

В 2005–2007 гг. ученым ПИЯФ совместно с коллегами из НИИ «Домен» и НИИ электрофизической аппаратуры (НИИЭФА, Санкт-Петербург) впервые в мире удалось создать магнитную ловушку УХН из постоянных магнитов, при помощи которой начались новые измерения времени жизни нейтрона.

Возможность хранения УХН в магнитных ловушках детально обсуждалась еще на заре их открытия В. В. Владимирским (ИТЭФ). В подобных системах УХН определенной поляризации отражаются магнитным барьером, не достигая стенки (то есть не испытывают соударений с самими стенками). Поэтому в магнитных ловушках возможность поглощения УХН стенкой при их отражении исключена принципиально. Задача же сводится к созданию магнитостатических систем, в которых магнитное поле нарастает во всех направлениях.

Современная технология позволяет создавать постоянные магниты с индукцией насыщения 1,4 Т и более. На основе таких магнитов в ПИЯФ была сконструирована и создана магнитная ловушка (рис. 8.24) с величиной магнитного поля у ее стенки порядка 1 Т, которое спадало до нуля на расстоянии порядка 0,5 см от стенки внутрь ловушки. Таким образом, толщина «магнитной стенки» у ловушки составляла около полусантиметра.

Эта ловушка была испытана на пучке УХН Института им. Лауэ – Ланжевена в Гренобле, и в течение 2008 г. совместно с группами из Мюнхенского технического университета и Института им. Лауэ – Ланжевена было измерено время жизни нейтрона (руководитель эксперимента В. Ф. Ежов, ПИЯФ РАН, см. рис. 8.24). Измеренная величина составила $878,3 \pm 1,9$ с, что подтвердило результат группы Сереброва.

Магнитная ловушка создана целиком на основе российских технологий. Необходимо отметить, что, хотя возможность хранения нейтронов в магнитной ловушке обсуждается уже более 50 лет, только сейчас реально создана магнитная система, которая может успешно конкурировать с лучшими материальными ловушками. Это также чисто российское достижение.

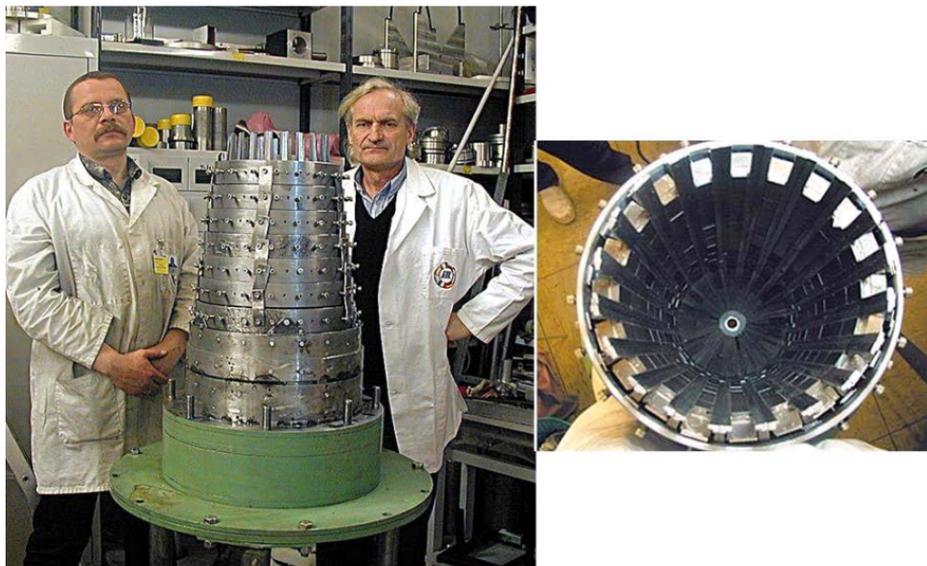


Рис. 8.24. Магнитная ловушка для хранения нейтронов и измерения их времени жизни. Руководитель эксперимента В. Ф. Ежов (справа) и Е. Г. Самсонов (ПИЯФ)

Полученный новый результат измерения времени жизни нейтрона оказался очень важным.

Во-первых, подтвердил справедливость Стандартной модели, устранив наметившееся ранее нарушение унитарности.

Во-вторых, на 0,15 % уменьшил предсказываемую распространенность гелия во Вселенной, тем самым приблизив ее к величине, получаемой из наблюдений молодых галактик.

В-третьих, новое время жизни нейтрона, использованное в расчете барионной асимметрии Вселенной в модели Большого взрыва, улучшает согласие с барионной асимметрией, полученной методом наблюдения реликтового излучения в микроволновом диапазоне.

В-четвертых, изменил расчетные сечения рассеяния нейтрино на протоне (что очень важно для калибровки детекторов нейтрино), поскольку время жизни нейтрона прямо связано с константой взаимодействия.

8.4.7. Новая загадка времени жизни нейтрона

Вместе с тем, произошло уточнение времени жизни принципиально другим – пучковым методом (рис. 8.25). Этот метод основан на регистрации продуктов распада холодных нейтронов (протонов и электронов) и подсчета числа распадов за время ($\sim 10^{-3}$ с) пролета нейтрона через установку, в отличие от метода хранения УХН, в котором регистрируются оставшиеся нейтроны после определенного времени хранения в ловушке. Таким образом, в методе хранения нейтронов измеряется время жизни, обусловленное всеми процессами (в том числе и неизвестными сейчас), в результате которых нейтрон исчезает из ловушки. В пучковом же методе измеряется время жизни нейтрона, обусловленное только его бета-распадом.

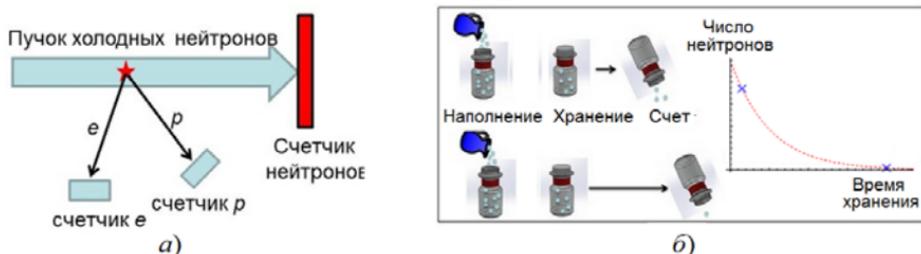


Рис. 8.25. Схема измерения времени жизни нейтрона: пучковым методом (а); методом хранения УХН (б)

В результате история продолжилась неожиданным образом. Последние измерения времени жизни нейтрона, проведенные в Национальном институте стандартов и технологий (НИСТ, США) в пучковых экспериментах с улучшенной точностью, дали результаты, отличающиеся от полученных методом хранения УХН на 8,3 с!!! Результаты таковы: $\tau_n = 886,8 \pm 1,2 \pm 3,2$ (НИСТ, 2003); $\tau_n = 887,7 \pm 1,2 \pm 1,9$ (НИСТ, 2013), то есть опять вернулись к практически такому же расхождению результатов, которое было в 2004 г. Только сейчас это расхождение принципиально разных методов измерения. Однако ошибки измерения пучковым методом все-таки достаточно велики и, чтобы с уверенностью утверждать о расхождении результатов экспериментов, необходимо довести их ошибки до уровня 0,2–0,3 с. Именно такую точность запланировано получить в новых проектах измерения времени жизни нейтрона как пучковым методом, так и методами хранения нейтронов в материальных и магнитных ловушках. Такие проекты реализуются сейчас институтами: ПИЯФ – в ИЛЛ, а также НИСТ и ЛАНЛ – в США.

8.4.8. Нейтральные токи

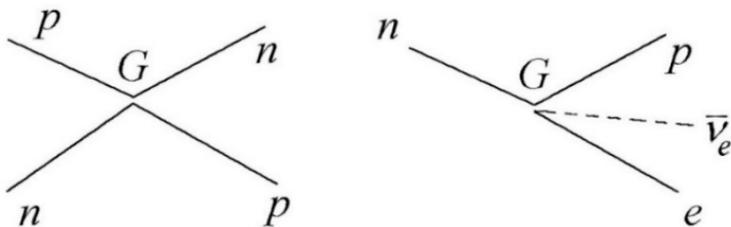
Интерес к разного рода опытам по поиску нарушения зеркальной инвариантности значительно возрос в связи с открытием нейтральных токов. Что это такое? До начала 70-х гг. наблюдались лишь слабые взаимодействия только заряженных токов, то есть только такие процессы, при которых происходит изменение зарядов взаимодействующих частиц, например процесс

$$n + e^+ \rightarrow p + \tilde{\nu}_e.$$

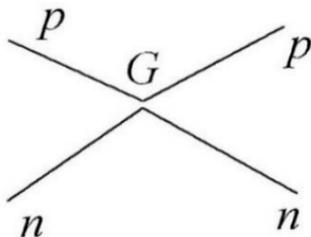
В нем происходит изменение заряда адрона: нейтрон переходит в протон – этот переход называется адронным током и условно обозначается как (pn) . А также изменение заряда лептона: позитрон переходит в антинейтрино или электрон – в нейтрино (лептонный ток $(e\nu)$). В процессе

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

изменяют заряд лептоны разных типов: мюон переходит в мюонное нейтрино, и при этом рождается электрон и электронное антинейтрино, и т. д. В результате в физике появилось магическое правило, разрешающее процессы, например, типа $(np)(pn)$ и $(np)(\nu e)$:

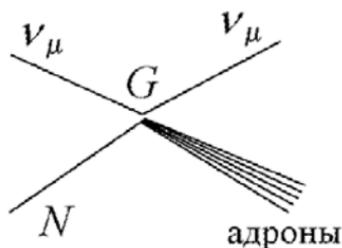


И запрещающее, например, процесс, изображенный ниже:

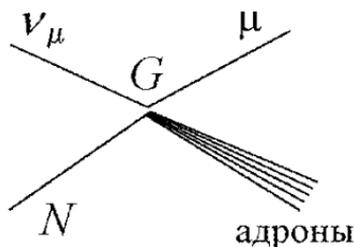


Этот процесс обусловлен взаимодействием так называемых нейтральных токов $(nn)(pp)$, в которых заряд частицы не изменяется. Искали нейтральные токи безуспешно до 1973 г. И наконец в 1973–1974 гг. на ускорителях в

ЦЕРН и Фермилабе были обнаружены «безмюонные» события при взаимодействии мюонных нейтрино с нуклонами типа $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu +$ (адроны):



Эти события и были идентифицированы как события, обусловленные слабым взаимодействием нейтральных токов. Обычное слабое взаимодействие должно было бы приводить к рождению мюона:



Самая естественная интерпретация безмюонного процесса такова, что открыт нейтральный ток. Если это так, то следует ожидать целый класс новых процессов в слабых взаимодействиях. Например, будут возможны следующие процессы: рассеяние электрона на нуклонах

$$e + n \rightarrow e + n,$$

$$e + p \rightarrow e + p$$

и, соответственно, рассеяние нуклонов на электроне. В результате, электрон в атоме будет взаимодействовать с нуклонами ядра и слабым взаимодействием, что приводит к образованию некоторой спиральной структуры электронной оболочки атома и что, в свою очередь, ведет к целому классу новых интересных явлений в атомной физике и оптике, например к появлению циркулярной поляризации в атомных оптических спектрах или спектрах μ -мезоатомов (это такие атомы, в которых вместо электрона вокруг ядра «вращается» мюон), а также к появлению оптической активности (для света) любого обычного вещества. Именно по P -неинвариантному повороту плос-

кости поляризации света в парах атомарного висмута в 1978 г. было обнаружено электрон-нуклонное слабое взаимодействие, обусловленное взаимодействием нейтральных токов. Затем не сохраняющее четность слабое взаимодействие электронов с нуклонами наблюдалось также в эксперименте на двухмиллионном линейном ускорителе в Стэнфорде (SLAC, США) по так называемому глубоко неупругому рассеянию продольно поляризованных электронов на протонах и дейтонах.

Наблюдалось зеркально неинвариантное вращение спина нейтрона в веществе. В величину поворота спина дают вклад слабые взаимодействия нейтрона с электронами, нейтронами и протонами вещества, обусловленные нейтральными токами. В принципе, выбирая разный изотопный состав вещества, можно отделить электронную часть взаимодействия нейтронов от ядерной.

В 1982 г. было обнаружено слабое взаимодействие тока ee с токами $\mu\mu$ и $\tau\tau$. Существенным является то, что все выявленные до сих пор нейтральные токи не меняют сорта (как сейчас говорят, *аромата*) участвующих в них частиц. Они переводят частицу в себя. Токи с изменением аромата, как, например, $e\mu$ или ds , не обнаружены в согласии с теорией, которая предсказывает существование 12 нейтральных токов (по числу кварков и лептонов в трех поколениях). Спиральная структура нейтральных токов оказалась более сложной, чем структура заряженных токов.

В заключение заметим, что существование нейтральных токов было предсказано единой теорией слабого и электромагнитного взаимодействий (для краткости иногда ее называют электрослабой теорией). Открытие нейтральных токов явилось одним из первых выдающихся успехов этой теории. Основным ее создателям, С. Вайнбергу, А. Саламу и Ш. Глэшоу, в 1979 г. была присуждена Нобелевская премия по физике.

Согласно электрослабой теории слабые и электромагнитные взаимодействия представляют собой проявления единого электрослабого взаимодействия. Слабые взаимодействия заряженных токов обусловлены обменом заряженными W_{\pm} -бозонами, а нейтральных – нейтральными Z -бозонами, аналогично тому как электромагнитные взаимодействия обусловлены обменом фотонами. При этом слабость и малый радиус слабого взаимодействия объясняются тем, что W - и Z -бозоны являются очень тяжелыми частицами. Их массы m и ширины Γ (связанные с временем жизни соотношением $\tau = \hbar/\Gamma$), соответственно, равны: $m_W = 80,425 \pm 0,38$ ГэВ, $\Gamma_W = 2,124 \pm \pm 0,041$ ГэВ; $m_Z = 91,1876 \pm 0,0021$ ГэВ, $\Gamma_Z = 2,4952 \pm 0,0023$ ГэВ. Эта теория вместе с квантовой хромодинамикой составляет основу современной Стандартной модели элементарных частиц и их взаимодействий. Главным триумфом Стандартной модели стало открытие в 1983 г. в ЦЕРН предсказываемых единой теорией W - и Z -бозонов. Беспрецедентно быстро для Нобелевского комитета, уже в 1984 г., «за решающий вклад в большой проект,

который привел к открытию полевых частиц W и Z – переносчиков слабых взаимодействий» двум физикам, Карло Руббиа и Симону ван дер Мееру, была присуждена Нобелевская премия.

8.4.9. Инвариантность относительно обращения движения

Еще до открытия несохранения пространственной четности была доказана так называемая CPT -теорема (Г. Людерс, 1954; В. Паули, 1955), которая гласит, что все законы природы должны быть инвариантны относительно CPT -преобразования, включающего в себя зарядовое сопряжение (замена частицы на античастицу), зеркальное отражение и обращение движения (инверсию времени – замену хода изменения времени на противоположное).

Сущность его, грубо говоря, в том, что CPT -преобразование сводится к некоторому преобразованию Лоренца, а точнее, она вытекает из релятивистской инвариантности и принципа причинности. В частности, из этой теоремы следует, что из CP -инвариантности должна вытекать и T -инвариантность и, наоборот, из нарушения CP должно вытекать нарушение T .

То, что слабые взаимодействия, нами рассмотренные, T -инвариантны, проверяется непосредственно на рис. 8.26, 8.27.

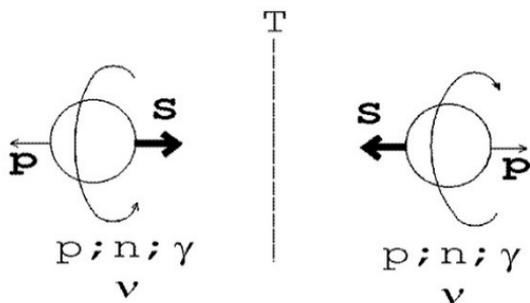


Рис. 8.26. T -инвариантные процессы распространения нейтрона, протона, фотона и нейтрино

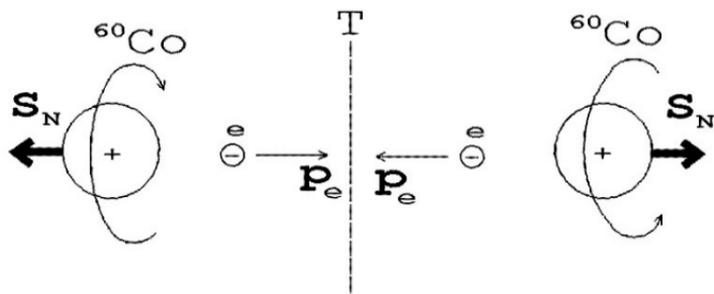


Рис. 8.27. T -инвариантная корреляция типа (SP) в бета-распаде ^{60}Co

Это следует и из того, что корреляция между спином и импульсом типа (SP) инвариантна относительно T -преобразования. Поэтому для проверки T -инвариантности нужно искать более сложные корреляции, например в бета-распаде нейтрона. Рассмотрим вылет электрона в направлении, перпендикулярном плоскости, образованной векторами спина нейтрона и импульса образовавшегося протона (то есть протона отдачи, или антинейтрино, при этом будем выделять только те протоны, которые летят перпендикулярно спину, рис. 8.28).

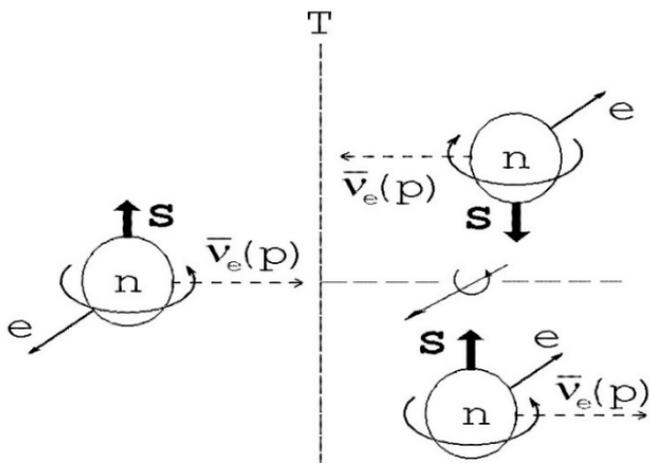


Рис. 8.28. Возможная T -неинвариантная корреляция в бета-распаде нейтрона

Из T -инвариантности будет следовать, что электроны должны испускаться симметрично относительно плоскости, в которой лежат векторы спина S_n нейтрона и импульса протона \mathbf{P}_p (плоскость рис. 8.28). Эту плоскость можно охарактеризовать перпендикулярным к ней векторным произ-

ведением $[\boldsymbol{\sigma}_n \times \mathbf{n}_p]$. Нарушение же T -инвариантности будет означать появление асимметрии относительно этой плоскости. Ее можно записать так: число электронов W , вылетающих в направлении \mathbf{P}_e , пропорционально следующему скалярно-векторному произведению:

$$W \sim 1 + D(\mathbf{n}_e, [\boldsymbol{\sigma}_n \times \mathbf{n}_p]).$$

Векторное произведение $[\boldsymbol{\sigma}_n \times \mathbf{n}_p]$ направлено перпендикулярно плоскости, образованной векторами $\mathbf{S}_n, \mathbf{P}_p$, в направлении, определяемом правилом правого винта при повороте от вектора \mathbf{S} к вектору \mathbf{P}_p . Оно как раз и определяет единичную нормаль к плоскости $(\mathbf{S}, \mathbf{P}_p)$, а D – степень различия в числе электронов, вылетевших по нормали и против нормали к этой плоскости.

С другой стороны, простое применение операции обращения движения дает изменение знака перед выражением $(\mathbf{P}_e, [\mathbf{S} \times \mathbf{P}_p])$, а следовательно, разную величину W , поскольку все три величины, входящие в это выражение, меняют знак (поэтому такая корреляция называется T -нечетной). Буквально такой эксперимент по поиску нарушения T -инвариантности в распаде холодных поляризованных нейтронов был проведен в ИЛЛ (2004). Оказалось, что на уровне $D = (-0,6 \pm 1,0) \cdot 10^{-3}$ асимметрия отсутствует.

8.4.10. Нарушение CP -инвариантности

Нарушенную зеркальную симметрию («горбатый» мир, по выражению Ландау) можно исправить, и вот каким способом. Давайте вместе с пространственным отражением (P) произведем операцию замены частиц на античастицы (зарядовое сопряжение C). Тогда нейтрино перейдет в антинейтрино, а антинейтрино как раз имеет противоположную спиральность (оно правовинтовое), и, следовательно, относительно операции CP симметрия восстанавливается. Также β^- -распад кобальта, в котором электроны вылетают против спина ядра, переходит в β^+ -распад антикобальта, в котором позитроны вылетают по спину ядра (рис. 8.29).

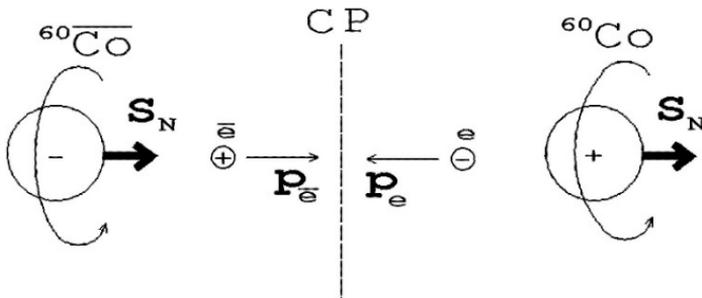


Рис. 8.29. Бета-распад в антимире

Таким образом, процесс, наблюдаемый в зеркале, – это процесс, реально происходящий в антимире, а поэтому, добавив операцию зарядового сопряжения, мы приходим опять к возможному процессу в нашем мире. Таким образом, бета-распад был бы изотропен, если бы наш мир состоял из одинаковой смеси ядер и антиядер и мы не умели бы различать частицы и античастицы. Гипотезу о такой зарядовозеркальной симметрии (или о сохранении комбинированной четности) выдвинули Ли, Янг и Ландау в 1957 г.

Однако и эта симметрия устояла недолго. В 1964 г. было обнаружено нарушение CP -инвариантности в распадах $K^0_2 \rightarrow 2\pi^0$, $K^0_2 \rightarrow \pi^+\pi^-$, которые запрещены CP -инвариантностью. В 1980 г. американские ученые Джеймс Кронин и Вал Фитч «за открытие нарушения принципа фундаментальной симметрии» были удостоены Нобелевской премии по физике. И до недавнего времени это был единственный случай нарушения CP (или T). Летом 2004 г. две большие международные коллаборации, Belle и BaBar, работающие в Японии и США, сообщили о наблюдении CP -нарушения в распадах нейтральных B -мезонов, содержащих тяжелые кварки.

Пока это уникальные известные случаи CP -нарушения (и также нарушения симметрии относительно обращения времени). Косвенным свидетельством такого нарушения является барионная асимметрия Вселенной, то есть тот факт, что наша Вселенная преимущественно состоит только из частиц, а не содержит равные количества частиц и античастиц.

8.4.11. Электрический дипольный момент нейтрона

В работе Л. Д. Ландау в 1957 г., где он высказал гипотезу о возможной симметрии законов природы относительно операции CP , им было также замечено, что наличие ЭДМ элементарной частицы требует одновременного нарушения как пространственной (P), так и временной (T), следовательно (из CPT -теоремы), и CP -инвариантностей.

Наличие ЭДМ у элементарной частицы нарушает P - и T -инвариантности вот почему. ЭДМ нейтральной частицы, например нейтрона, отражает неравномерное распределение заряда по объему частицы – смещение центра распределения положительного заряда относительно центра отрицательного. Представим нейтрон упрощенно в виде двух шариков с противоположными зарядами $\pm e$ (e – заряд электрона) и расстоянием d между их центрами. Пусть \mathbf{d} – вектор, соединяющий центры шариков и направленный от положительного заряда к отрицательному. Тогда по определению ЭДМ – это вектор $\mathbf{D} = e \cdot \mathbf{d}$ (его величина равна $D = e \cdot d$). Наличие присущего нейтрону выделенного направления, связанного со спином \mathbf{S} , навязывает это направление и вектору \mathbf{D} , который должен быть параллелен либо антипараллелен вектору спина. На рисунке 8.30 (справа, внизу) изображен нейтрон, полученный в результате операции отражения в зеркале, поэтому направление вектора \mathbf{D} осталось прежним, а направление вращения (то есть спина) изменилось на противоположное. Аналогично и при изменении знака времени (T -инверсии) вектор \mathbf{D} не меняется, тогда как вектор \mathbf{S} меняет знак, поскольку направление «вращения» частицы изменяется на противоположное (рис. 8.30 справа, вверху). Инвариантность относительно любого из этих преобразований означала бы равновероятные в противоположных направлениях (по и против спина) ориентации вектора \mathbf{D} . В результате среднее значение \mathbf{D} обратилось бы в нуль.

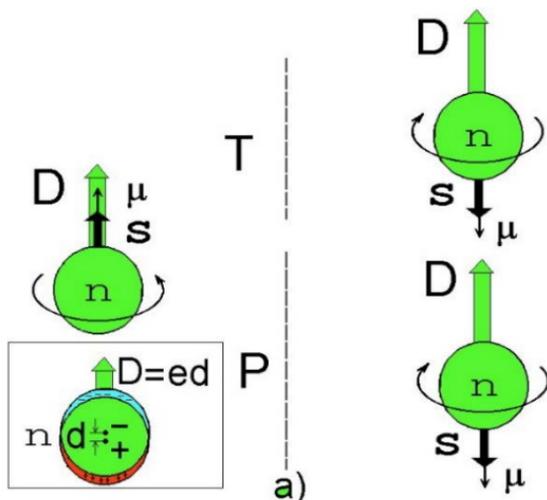


Рис. 8.30. ЭДМ нейтрона, нарушающий зеркальную и временную инвариантность. Имеющийся у нейтрона магнитный момент не нарушает этих симметрий

Поскольку P -инвариантность нарушается слабыми взаимодействиями и в то же время последние не нарушают T -инвариантность (см. рис. 8.26, 8.27), то наличие ЭДМ будет, с одной стороны, свидетельствовать о нарушении T -симметрии, а с другой – о существовании какого-то, до сих пор неизвестного, взаимодействия.

8.4.12. Как обнаружить электрический дипольный момент нейтрона?

Хотя у нейтрона и отсутствует электрический заряд, тем не менее нейтрон взаимодействует с электромагнитным полем, поскольку имеет магнитный момент. Магнитное поле стремится ориентировать магнитный момент вдоль поля (аналогично тому, как электрическое поле стремилось бы ориентировать ЭДМ вдоль своего направления, действуя в разные стороны на противоположные заряды на концах диполя). Однако нейтрон представляет собой аналог быстро вращающегося волчка, а что происходит с обычным волчком, когда, например, поле тяжести «пытается» его наклонить, то есть изменить ориентацию, мы знаем. Ось волчка начинает вращаться (прецессировать) относительно направления силы тяжести, причем чем больше сила, тем быстрее прецессирует волчок. То же самое происходит и с нейтроном, помещенным в магнитное поле, которое стремится изменить ориентацию спина нейтрона. Спин нейтрона начинает прецессировать вокруг магнитного поля. А в том случае, если нейтрон обладает еще и ЭДМ, то, прикладывая электрическое поле по магнитному, либо против него, мы будем менять силу, стремящуюся ориентировать нейтрон, и, тем самым, скорость прецессии спина нейтрона. Все способы поиска ЭДМ нейтрона основаны на обнаружении эффектов изменения скорости прецессии спина нейтрона при приложении электрического поля. Разная скорость прецессии приводит к разному углу поворота спина нейтрона за одно и то же время пребывания в электрических полях разного знака. Изменение угла поворота при переключении знака электрического поля будет свидетельствовать о наличии ЭДМ. Оно обычно и подлежит экспериментальному определению. Очевидно, что эффекты, которые обусловлены наличием у нейтрона ЭДМ (например, добавочный угол поворота спина за счет взаимодействия ЭДМ с электрическим полем), должны расти с возрастанием электрического поля, приложенного к нейтрону, а также с увеличением времени пребывания нейтрона в этом поле.

В методе поиска ЭДМ, использующем УХН, самом чувствительном в настоящее время, высокая чувствительность достигается за счет очень большого времени (~ 100 с) нахождения УХН во внешнем электрическом поле.

Кардинальное улучшение чувствительности этого метода было достигнуто в результате создания сначала в ПИЯФ, а затем и в ИЛЛ интенсивных источников УХН. Время пролета нейтроном области электрического

поля в эксперименте при переходе от тепловых нейтронов, двигающихся со скоростями 1–2 км/с, или холодных (скорости ~ 800 м/с), к ультрахолодным, скорости которых всего 5–10 м/с, увеличивается в несколько сот раз. Во столько же раз чувствительность эксперимента становится выше. Еще большего возрастания времени удалось добиться в накопительном варианте установки, в котором УХН собираются и хранятся в сосуде, к которому прикладывается одновременно магнитное и сильное электрическое поля. Время нахождения нейтрона в электрическом поле в этом случае удается довести до 70–100 с (по сравнению с 10^{-3} с для холодных нейтронов).

Другим, альтернативным методом с более высокой чувствительностью может стать дифракционный метод поиска ЭДМ с холодными нейтронами, но с полями, на 4–5 порядков превышающими поля, используемые в методе УХН. Он основан на новом, предсказанном и обнаруженном в ПИЯФ, эффекте взаимодействия нейтронов с сильными электрическими внутрикристаллическими полями, проявляющемся при их дифракции в кристалле, решетка которого не имеет центра симметрии.

А теперь попытаемся ответить на вопрос, зачем и насколько важно искать ЭДМ нейтрона.

8.4.13. Захватывающая загадка современности – барионная асимметрия Вселенной

Барионная асимметрия Вселенной – это отсутствие во Вселенной антивещества в сопоставимых с веществом количествах. Из экспериментов по поиску аннигиляционных гамма-квантов следует, что в нашем скоплении галактик доля антивещества меньше чем 10^{-4} .

Величина барионной асимметрии Вселенной определяется как

$$\delta_B = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \approx \frac{n_B}{n_\gamma} = 10^{-8} - 10^{-10},$$

где n , $n_{\bar{B}}$ и n_γ – концентрации барионов, антибарионов и реликтовых фотонов во Вселенной.

Величина $\delta_B = 10^{-8} - 10^{-10}$ следует из данных по реликтовому излучению, оценкам космологической плотности вещества, получаемой из скорости расширения Вселенной, а также из оценок масс видимого вещества галактик. Она совпадает по порядку величины с относительным избытком барионов над антибарионами на ранней стадии формирования Вселенной до момента $t \sim 10^{-6}$ с, в который температура Вселенной стала $T \sim 1$ ГэВ (после этого фотоны перестали рожать барион-антибарионные пары, остался один процесс аннигиляции оставшихся пар, который происходил до тех пор, пока

не закончились антибарионы). В случае если бы имелась барионная симметрия, Вселенная сейчас бы состояла из одних реликтовых фотонов.

Для возможного объяснения наблюдаемой барионной асимметрии Вселенной необходимо предположить (это впервые заметил А. Д. Сахаров в 1967 г.), что, во-первых, существует взаимодействие, не сохраняющее барионное число, и, во-вторых, взаимодействие, нарушающее CP -инвариантность. В Стандартной модели такие взаимодействия отсутствуют. В ней можно объяснить нарушение CP -симметрии в распадах K - и B -мезонов, однако при этом барионная асимметрия предсказывается на уровне 10^{-23} – 10^{-25} , тогда как из наблюдений она 10^{-8} – 10^{-10} . Таким образом, вещества во Вселенной по Стандартной модели должно быть на 15 порядков меньше, чем мы наблюдаем. Это означает, что по Стандартной модели нас с вами не должно существовать. Поэтому поиски новых механизмов нарушения CP -симметрии, как и поиски процессов, нарушающих закон сохранения барионного числа, очень важны для объяснения барионной асимметрии Вселенной. Решение этих проблем является одним из «краеугольных камней» современной физики.

8.4.14. Поиск электрического дипольного момента нейтрона

Обнаруженное нарушение CP -симметрии в распадах K - и B -мезонов, если его учесть в рамках Стандартной модели, приводит к величине ЭДМ нейтрона на уровне $\sim 10^{-31}$ – 10^{-33} $e \cdot \text{см}$. Такая величина недоступна для измерения, поскольку далеко выходит за рамки современных возможностей эксперимента.

Однако в моделях, выходящих за рамки Стандартной модели и объясняющих барионную асимметрию Вселенной, ЭДМ нейтрона оказывается на уровне $\sim 10^{-26}$ – 10^{-28} $e \cdot \text{см}$, где уже имеется принципиальная возможность его экспериментального обнаружения, что было бы прямым свидетельством в пользу таких моделей. К ним относятся, например, объединяющие различные взаимодействия так называемые суперсимметричные модели и модели Великого объединения. В настоящее время ведется подготовка нескольких экспериментов по поиску ЭДМ нейтрона на этом уровне точности.

Таким образом, увеличение точности измерений в нейтронной физике позволяет получать результаты, вполне сопоставимые по важности с результатами, получаемыми на дорогостоящих суперколлайдерах, и могут существенно их дополнять. Обнаружение ЭДМ нейтрона свидетельствовало бы, в частности, о наличии суперсимметричных частиц, которые собираются искать в прямых столкновениях протонов, ускоренных до огромных энергий в десятки ТэВ (1 ТэВ = 1 000 ГэВ). Поэтому поиск ЭДМ нейтрона и установление ограничений на его величину – одна из самых важных задач современной физики, поскольку T - и CP -инвариантности определяют как свойства Вселенной, так и свойства взаимодействий элементарных частиц.

На важность поиска ЭДМ нейтрона с этой точки зрения указал американский ученый Н. Ф. Рамзей в 1958 г., хотя некоторые соображения по этому поводу высказывались им и Э. Перселлом еще в 1950 г. Они тогда отметили, что теоретические соображения в пользу отсутствия ЭДМ у элементарных частиц (в частности, из-за нарушения им зеркальной (P) инвариантности) требуют экспериментальной проверки и что они вместе с С. Смитом начали работу по измерению ЭДМ нейтрона. Их первый результат: $D < 5 \cdot 10^{-20} e \cdot \text{см}$. Он не противоречил P -инвариантности, поэтому авторы не уделили ему особого внимания. Этот результат был приведен в книге Рамзея «Молекулярные пучки», вышедшей в 1956 г., а отдельной статьей опубликован лишь в 1957 г. после обнаружения нарушения P -инвариантности в экспериментах группы Ву.

Только открытие нарушения CP -симметрии вызвало активный интерес к поиску ЭДМ нейтрона. И хотя обнаружить его пока не удается, экспериментально установленные ограничения на его величину уже сыграли свою роль, позволив, по выражению Голуба и Ломоро, «исключить больше теорий (предложенных для объяснения K -распада), чем это сделал любой другой эксперимент за всю историю физики».

До настоящего времени наиболее точным методом измерения ЭДМ является метод УХН – магниторезонансный метод Рамзея с использованием УХН, развиваемый в ПИЯФ (Гатчина) и ИЛЛ (Гренобль, Франция). Соответствующий верхний предел на величину ЭДМ нейтрона, полученный к 1989 г. в результате эксперимента, длившегося в течение более двух десятилетий в ПИЯФ, таков:

$$D < 9,7 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}.$$

Последующие измерения в ИЛЛ в течение еще 15 лет к 2005 г. дали сравнительно небольшое улучшение результата:

$$D < 3 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}.$$

Это одна из самых высоких точностей, достигнутых в мире к настоящему времени. Если нейтрон представить в виде шара размером $R \approx 10^{-13}$ см, то $D/R \approx 3,1 \cdot 10^{-13}$. Такая доля от радиуса Земли составляет ~ 2 мкм! Следует заметить, что двухкамерный дифференциальный ЭДМ-спектрометр ПИЯФ приблизительно в два раза чувствительнее однокамерного спектрометра ИЛЛ.

В настоящее время к поиску ЭДМ нейтрона успешно присоединилась коллаборация из 17 европейских институтов и университетов, работающая на недавно запущенном источнике УХН в Швейцарии в Институте им. Пауля Шеррера, которая к 2020 г., хоть и незначительно, но улучшила указанное выше ограничение. Теперь оно стало: $D < 1,8 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$.

Сейчас в ПИЯФ наряду с существенной модернизацией ЭДМ-спектрометра ведется создание нового суперисточника УХН с рекордной плот-

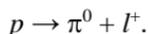
ностью (руководитель А. П. Серебров) на построенном и недавно запущенном в Гатчине реакторе ПИК, что позволит провести измерения ЭДМ нейтрона с точностью на уровне $10^{-27} e \cdot \text{см}$ и вернуть ПИЯФ лидирующие позиции в этих измерениях. Основой нового источника УХН является их прямое получение из холодных за счет рождения холодным нейтроном «квазичастицы» – фонона или ротона, которые представляют собой элементарные возбуждения в жидком сверхтекучем гелии (то есть нейтрон отдает на это возбуждение практически всю свою энергию и становится ультрахолодным). На такую возможность получения УХН впервые указали Р. Голуб и Д. М. Пендлебери в 1977 г. Очень важной для создания подобного источника является еще и колоссальная прозрачность сверхтекучего гелия для нейтронов низких энергий, на что обратили внимание И. Я. Померанчук и А. И. Ахиезер еще в 1945 г. УХН могут «жить» в таком гелии сотни секунд, что и позволяет накапливать их в сосуде, наполненном сверхтекучим гелием до рекордных плотностей (детальнее см. *Серебров А. П.* «Исследования фундаментальных взаимодействий в ПИЯФ НИЦ КИ с нейтронами и нейтрино на реакторах». УФН. 2015. Т. 185. № 11. С. 1179–1201).

Кроме этого, в ПИЯФ развивается совершенно новый дифракционный метод поиска ЭДМ нейтрона (руководители В. В. Федоров и В. В. Воронин), основанный на том, что в совершенных кристаллах, в которых отсутствует центр симметрии, на нейтрон, движущийся в условиях, близких к условиям Вульфа – Брэгга, действуют сильные внутрикристаллические электрические поля. Они достигают величин 10^9 В/см , которые на 4–5 порядков превосходят поля, используемые в экспериментах с УХН. Эти поля были предсказаны, экспериментально обнаружены и исследованы в ПИЯФ. Наличие таких полей и возможность управлять временем пребывания нейтрона в кристалле дают принципиально новую возможность поиска ЭДМ нейтрона с использованием холодных нейтронов. Первые тестовые эксперименты показали, что чувствительность предложенного нового метода может быть уже сейчас на уровне $(4-6) \cdot 10^{-27} e \cdot \text{см}$ при использовании имеющегося в наличии оборудования и кристаллов кварца на наиболее интенсивном в настоящий момент пучке холодных поляризованных нейтронов реактора ИЛЛ. Ввод в строй высокопоточного реактора ПИК в ПИЯФ позволит получить еще более интенсивные пучки холодных нейтронов.

В настоящее время в мире конкурируют около десятка различных проектов поиска ЭДМ нейтрона с использованием магниторезонансного метода на УХН, но результаты измерений имеются пока всего в трех группах. В большинстве проектов участвуют коллаборации из многих институтов Америки, Европы и Азии, что свидетельствует о жесткой конкуренции в этой области, а также о высоком приоритете этих работ и их важности для понимания явлений, происходящих как на уровне элементарных частиц, так и в масштабах Вселенной.

8.4.15. Распад протона и нейтрон-антинейтронные осцилляции

В современных теориях, объединяющих все известные виды взаимодействий (так называемые теории Великого объединения и суперсимметричные теории), которые объясняют барионную асимметрию Вселенной, допускается нарушение барионного и лептонного чисел и, как следствие, распад протона, который может происходить, например, по схеме



Если протон распадается на лептон (электрон или мюон) и пи-мезон, следовательно атомы и все обычное вещество во Вселенной могут быть нестабильными. Это вызвало большой интерес научной общественности, и начались интенсивные поиски распада протона. К настоящему времени получено следующее ограничение на его время жизни:

$$\tau_p > 10^{31} - 10^{33} \text{ лет.}$$

Эта величина гораздо больше времени существования Вселенной, равного $\sim 1,4 \cdot 10^{10}$ лет.

При распаде нейтрона (например, на мезон и лептон) барионное число меняется на единицу. В некоторых теориях разрешены процессы с изменением барионного числа и на два. Тогда становится возможным переход нейтрона в антинейтрон и обратно: $n \leftrightarrow \bar{n}$. Такие переходы приводят к процессу периодического превращения нейтрона в антинейтрон и обратно. Этот процесс называется нейтрон-антинейтронными осцилляциями. Они могут наблюдаться по продуктам аннигиляции антинейтрона.

Такой эксперимент по поиску осцилляций свободного нейтрона был проведен в ИЛЛ на интенсивном пучке холодных нейтронов от реактора. Нейтроны со средней скоростью около 600 м/с в откачанной и экранированной от магнитных полей (до уровня $2 \cdot 10^{-4}$ Гс) трубе проходили расстояние около 60 м (в течение $t \approx 0,1$ с), затем проходили через мишень – углеродную фольгу толщиной 130 мкм и диаметром 1,1 м, прозрачную для нейтронов и полностью (в 99 случаях из 100) поглощающую антинейтроны за счет аннигиляции. Мишень была окружена детекторами для регистрации и идентификации событий от продуктов аннигиляции (например, пи-мезонов). Через мишень было пропущено всего около $3 \cdot 10^{18}$ нейтронов, событий аннигиляции зарегистрировано не было. В результате получена следующая оценка на период осцилляций: $\tau_{n\bar{n}} \geq 8,6 \cdot 10^7$ с.

Заметим, что 1 год = $3,15 \cdot 10^7$ с. Косвенные ограничения на период $n\bar{n}$ -осцилляций можно получить из экспериментов по поиску нестабильности материи. Превращение в ядре нейтрона в антинейтрон привело бы к его аннигиляции с выделением энергии ~ 2 ГэВ.

Поиском такого рода событий, связанных с аннигиляцией антинейтронов в ядрах, занимается ряд крупных международных коллабораций. Одна из них – Судан-2, включающая ряд институтов США и Великобритании, недавно сообщила о наблюдении $(4,5 \pm 1,2)$ событий, которые могли бы быть идентифицированы как события от $\bar{n}N$ -аннигиляции, откуда следуют ограничения на время жизни ядра железа ($\tau_{Fe} \geq 7,2 \cdot 10^{31}$ лет) и на период осцилляций свободного нейтрона: $\tau_{\bar{n}} \geq 1,3 \cdot 10^8$ с.

В заключение заметим, что в современной физике элементарных частиц тесно переплелись и космология, и свойства Вселенной на ранней стадии образования, и собственно структура элементарных частиц и их взаимодействий, ядерная физика и физика фазовых превращений.

Для получения новых данных в этой области имеются два пути. Первый – это увеличение энергий ускоряемых, а затем сталкивающихся частиц и ядер в физике высоких энергий для поиска новых частиц (например, хиггсовских бозонов, суперсимметричных партнеров обычных частиц или новых форм вещества типа кварк-глюонной плазмы). Этот путь требует создания дорогостоящих ускорителей и, соответственно, совместных усилий и участия многих стран. На этом пути Россия успешно участвует в большинстве крупных международных проектов практически на всех существующих и строящихся в мире ускорителях.

Второй путь – это увеличение точности измерений в физике средних энергий, в частности в нейтронной физике. Для этой цели необходимы высокоинтенсивные источники нейтронов, поскольку для увеличения точности необходимо увеличение числа регистрируемых полезных событий (статистики), кроме того, необходимы также новые идеи, методики и нестандартное оборудование. Следует заметить, что хотя реактор и является достаточно дорогостоящим прибором, тем не менее его цена ни в какое сравнение не идет с ценой современного суперколлайдера.

Нейтрон участвует во всех видах известных взаимодействий. Поэтому эксперименты по изучению фундаментальных свойств нейтрона, такие как поиск и измерение ЭДМ нейтрона, поиск нейтрон-антинейтронных осцилляций, уточнение времени жизни нейтрона, работы по изучению фундаментальных симметрий в процессах с участием нейтрона (от бета-распада и нейтронной оптики до ядерных реакций, деления и физики нейтрино), имеют первостепенную важность для решения тех загадок, которые регулярно подбрасывает нам природа. Они позволяют понять, как «устроены» частицы и их взаимодействия, и, в то же время, проникнуть в тайны образования и строения Вселенной.

Содержание

Часть 1. Окружающий нас мир	3
Часть 2. Структура вещества	36
Часть 3. Строение атома. Эксперименты Резерфорда	77
Часть 4. Строение атома. Спектры излучения	116
Часть 5. Волновые свойства частиц. Опыты по дифракции	155
Часть 6. Расщепление ядер. Ядерные реакции	172
Часть 7. Нейтроны в современном мире	194
Часть 8. Симметрии и бета-распад	228

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
188300, Гатчина Ленинградской обл., мкр. Орлова роща, д. 1
Зак. 382, тир. 35, уч.-изд. л. 19; 28.05.2021.