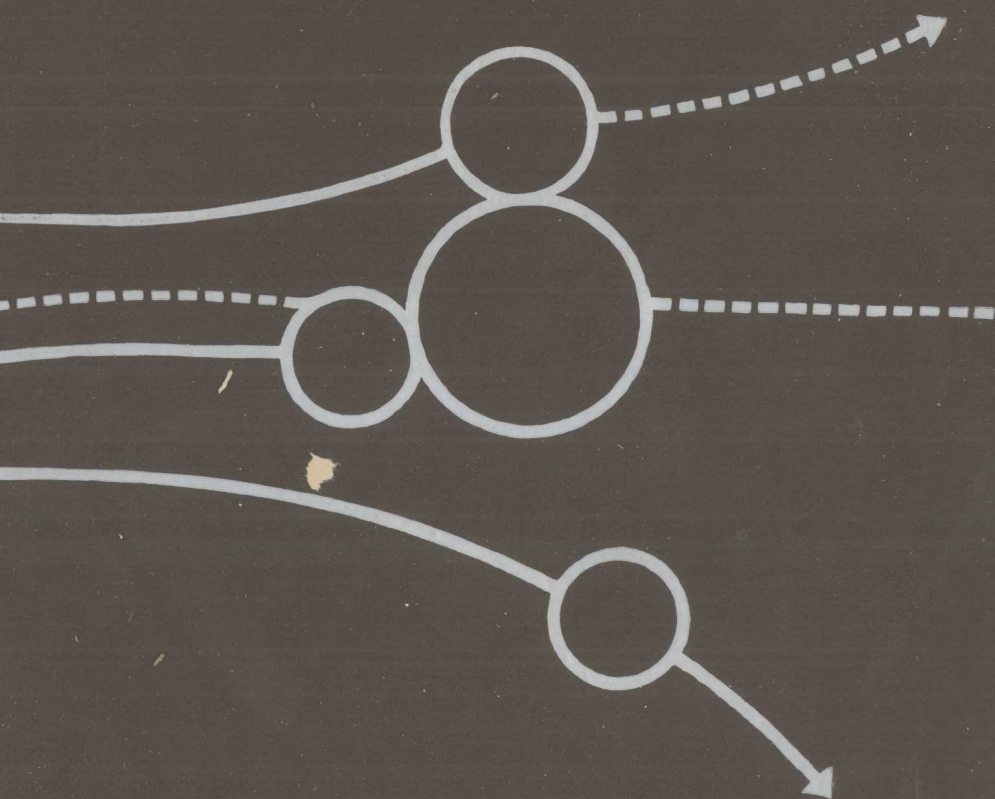


Л. Валантэн

СУБАТОМНАЯ ФИЗИКА: ЯДРА И ЧАСТИЦЫ

1. Элементарный подход



СУБАТОМНАЯ ФИЗИКА: ЯДРА И ЧАСТИЦЫ

Том 1

Luc Valentin Professeur à l'Université Paris VII

**PHYSIQUE SUBATOMIQUE:
NOYAUX ET PARTICULES**

Nouvelle édition entièrement refondue

1. Approche élémentaire

Hermann Paris

Л.Валантэн

СУБАТОМНАЯ ФИЗИКА: ЯДРА И ЧАСТИЦЫ

В двух томах

Том 1

Элементарный подход

Перевод с французского
канд. физ.-мат. наук
Н.Н.Колесникова



Москва «Мир» 1986

ББК 22.38
В15
УДК 539.12

Валантэн Л.

В15 Субатомная физика (ядра и частицы): В 2-х т. Т. 1.
Элементарный подход: Пер. с франц.— М.: Мир. 1986.—
21 л., ил., 272 с.

Книга известного французского физика-теоретика написана как учебное пособие для студентов французских университетов, изучающих ядерную физику и физику элементарных частиц. В ней излагаются общие представления физики атомного ядра и частиц, а также рассматриваются ее приложения в различных разделах науки и техники. Книга не требует от читателя предварительного знакомства с квантовой механикой и представляет собой хорошее введение к серьезному изучению ядерной физики.

Предназначена для широкого круга читателей от учащихся старших классов и преподавателей средней школы до молодых научных работников разных специальностей, желающих ознакомиться с современной ядерной физикой. Может служить учебным пособием для студентов университетов и вузов, специализирующихся по ядерной физике.

В $\frac{1704070000-252}{041(01)-86}$ 74—86, ч. 1

ББК 22.38

Редакция литературы по физике

Люк Валантэн

СУБАТОМНАЯ ФИЗИКА: ЯДРА И ЧАСТИЦЫ

В двух томах Том 1

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ПОДХОД

Научн. редактор Е. С. Куранский Мл. научн. редакторы Г. Г. Сорокина, В. Н. Цлаф
Художник Б. П. Кузнецов Художественный редактор К. В. Радченко
Технический редактор Т. А. Максимова Корректор Т. П. Пашковская.

ИБ № 5393

Сдано в набор 01.10.85. Подписано к печати 18.02.86. Формат 60×90^{1/4}. Бумага кн. журн. имп. Печать высокая. Гарнитура литературная. Объем 8,50 бум. л. Усл. печ. л. 17. Усл. кр.-отт. 17. Уч.-изд. л. 16,24. Изд. № 2/3985. Тираж 10 000 экз. Заказ № 1654. Цена 1 р. 50 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР», 129820, ГСП, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 113054, Москва, Вавоная, 28

© 1982, Hermann, 75015 Paris
© перевод на русский язык, «Мир», 1986.

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Двухтомная книга, предлагаемая вниманию читателя, представляет собой перевод 2-го издания книги французского физика Люка Валантэна, выпущенной парижским издательством «Эрманн» в 1982 г. Ее первое французское издание (1975 г.) было однотомным. При переиздании книга была существенно переработана и дополнена, а также разделена на два тома.

Автор книги — профессор Парижского университета VII, работающий в научно-исследовательском центре ядерных исследований в Орсе. Он известен своими работами по физике высоких энергий, в последние годы занимается физикой атомного ядра.

Книга Валантэна издана в серии «Преподавание наук», которая предназначена для читателей с различным уровнем подготовленности. Книги этой серии пишутся известными специалистами, которые в целом следуют университетским программам, но избранные вопросы рассматривают более подробно, выражая собственную точку зрения. Поэтому такие книги широко используются и во Франции, и за ее пределами как студентами, так и специалистами.

Сказанное относится и к книге Л. Валантэна «Субатомная физика». Адресована она главным образом читателю, не имеющему специальной подготовки. В особенности это относится к первому тому, название которого «Элементарный подход» соответствует характеру изложения. Его чтение не требует знания квантовой механики, что делает его доступным весьма широкому кругу читателей, в том числе и учащимся старших классов школ. Этому способствует принятый автором язык аналогий, а также своего рода метод последовательных приближений, в соответствии с которым вводимые вначале понятия в дальнейшем уточняются и необходимым образом интерпретируются. Попутно читатель знакомится с терминологией и с методами решения задач субатомной физики.

В I части (книга состоит из четырех частей) читатель получает общие представления о проблемах субатомной физики, а во II части знакомится с вопросами техники эксперимента и с некоторыми приложениями физики ядра и частиц, в частности и такими, которые не включаются в традиционные курсы ядерной физики (ядерная астрофизика, космологические модели).

Том второй «Дальнейшее развитие» (части III и IV) написан на более высоком математическом уровне с использованием аппарата квантовой механики и может служить учебным пособием для сту-

дентов наших университетов и вузов. В III части упор делается на модели, используемые в физике атомного ядра, и на их применение; последняя часть (ч. IV) посвящена физике элементарных частиц, которая излагается в тесной связи с законами сохранения.

Структура книги, включающей в общей сложности 14 глав, отражает стремление автора сделать ее доступной для возможно более широкого круга читателей. Помимо основного текста в каждой из глав имеются приложения, в которых содержатся дополнительные сведения или уточнения, а также полезные упражнения. Кроме того, имеются многочисленные дополнения, главным образом математического характера.

Субатомная физика представляет собой, как подчеркивается и в книге, область соприкосновения самых различных дисциплин. Учитывая это и доступность изложения в книге Валантэна, можно рекомендовать ее специалистам смежных областей. Книга написана на современном уровне, и в ней найдут немало интересного и те научные сотрудники и преподаватели, деятельность которых непосредственно связана с ядерной физикой. Кроме всего прочего они могут получить представление о преподавании ядерной физики во Франции.

Наконец, многих читателей заинтересуют включенные (в качестве приложения) в русское издание книги Валантэна новейшие таблицы масс ядер, опубликованные Вапстрой и Ауди в 1985 г. в журнале «Nuclear Physics» (т. A432, № 1).

Н. Н. Колесников

ВВЕДЕНИЕ

Различие между ядром и элементарной частицей, такой, как нейтрон или протон, не меньше, чем между кристаллом и атомом. И все же мы будем (отчасти из соображений удобства терминологии) объединять под общим названием субатомной физики исследования, относящиеся и к ядрам, и к частицам.

Это развивающиеся разделы физики, едва вышедшие из несовершенного детства, которые еще время от времени лихорадит (так же, как было и с другими разделами до построения законченной теории) при появлении новых неожиданных выводов и модных истолкований. Большая часть последних будет забыта на следующий день, в одних случаях ускорив, в других — замедлив общую эволюцию познания. Не имея здесь возможности входить в споры школ, хотя они и увлекательны в ряде отношений, мы будем лишь мимоходом упоминать о них.

В то же время имеется масса результатов, терпеливо накопленных со времени открытия радиоактивности, которое было сделано почти столетие назад. Многие из них теперь благодаря их техническому применению вошли в нашу жизнь. То, что сохранило время и традиции, частично преподается уже в средней школе. В данной книге мы коснемся таких результатов, хотя и не будем подробно останавливаться на них.

Кроме всего этого существует очень много разрозненных фактов и зачатки теорий, для которых, по-видимому, возможен некоторый синтез. При наличии такой пестрой картины тому, кто пишет вводный курс, невозможно избежать отсева материала. Мы в этом вопросе исходили из того, что профессиональная деятельность большинства читателей, которым мы адресуем книгу, не будет связана с субатомной физикой. Поэтому, чтобы книга была полезна каждому независимо от его специальности, мы строим общую схему изложения, стремясь показать, что физика ядра и физика частиц — это дисциплины, не изолированные не только друг от друга, но и от других разделов физики. Правда, дело это весьма деликатное, так как физики, подобно специалистам других областей, часто вынуждены вследствие сложности научной аппаратуры, вычислений и математической теории распределять задачи с риском потеряться в деталях или даже самоизолироваться из-за терминологии. Соединить то, что разрознено, представляется нужным делом. Мы попытаемся это сделать, широко используя аналогии.

Чтобы удовлетворить читателей с разным уровнем подготовленности, мы прибегли к изложению по принципу последовательного приближения, разбив книгу на четыре части, дополняющие (эпистемологически и педагогически) одна другую. В первой части

мы вводим эвристическим и даже интуитивным путем важнейшие идеи субатомной физики. Мы следили за тем, чтобы для ее понимания не требовались солидные знания по квантовой механике. Во второй части собраны те приложения субатомной физики, которые могут представить интерес для широкого круга читателей. Обе эти части составляют первый том, написанный с акцентом на качественное описание явлений. Он задуман как пособие, доступное студентам первого курса вузов и преподавателям старших классов школ, но будет полезен и студентам старших курсов физических специальностей.

Второй том, где мы также не будем пренебрегать качественным рассмотрением, больше рассчитан на читателей второго типа. Он начинается третьей частью, посвященной физике ядра, в которой излагаются вопросы, представляющие общий интерес. В частности, в ней дается понятие феноменологической модели и вырожденного ферми-газа, излагаются методы описания состояний системы N тел, полуклассическая теория излучения и т. д. Попутно читатель знакомится с приемами, используемыми в элементарной квантовой механике. В четвертой части, посвященной главным образом элементарным частицам, акцент делается на законы сохранения, которые связываются с принципами инвариантности, являющимися основой для теорий объединения, пока еще незавершенных и сырых.

Данное введение в физику ядра и частиц основано на дополняющих друг друга курсах: курсе ядерной физики, читавшемся на старших курсах физических факультетов в парижских университетах, расширенном курсе физики для студентов физических специальностей (СЗ и С4) в Парижском университете VII и, наконец, «курсе повышения квалификации преподавателей средних школ» в Парижском университете XI.

Мы рассчитываем, что наш труд позволит всем его читателям получить представление о физике ядра и частиц. Мы надеемся также, что каждый прочитавший книгу почувствует себя достаточно подготовленным для понимания и критического осмысления популярных статей, периодически появляющихся в таких журналах, как *La Recherche*, по поводу новых достижений физики в области тяжелых ионов, физики высоких энергий, ядерной астрофизики, АЭС и т. д.

Мне хотелось бы поблагодарить преподавателей группы СЗ — М. Ардити, Б. Мореля и Г. Рюэнстэна, а также всех тех, кто ознакомился с рукописью и высказался одобрительно или сделал критические замечания. Нет возможности здесь всех перечислить, но я помню, кому и чем обязан. Я признателен мадам Жаклин Дюфарне за ее беспримерное терпение при перепечатке рукописи. Наконец, мне хотелось бы еще раз повторить Доминике, что для меня было неоценимой поддержкой то понимание, которое она проявляла в продолжение всего долгого времени, когда писалась рукопись.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Наши педагогические намерения определяются во введениях, которыми открывается каждая из четырех частей настоящей книги. Здесь же мы ограничимся несколькими общими замечаниями.

Прежде всего без ущерба для дальнейшего можно опускать места, напечатанные мелким шрифтом. В них содержатся соображения по поводу специальных вопросов, которые не было целесообразно рассматривать в рамках данной книги. Читателю, совершенно не знакомому с квантовой механикой, следует их пропускать.

С учетом сказанного мы рекомендуем читать первую часть по порядку. Неточности содержащихся в ней аналогий исправляются в последующих главах и дополнениях (параграфы, указанные в тексте), но при первом чтении последние будут полезны лишь для читателей с солидной теоретической подготовкой.

Этот совет менее категоричен в отношении других частей, так как первая часть построена таким образом, чтобы три последующие были практически независимыми и их можно было читать в любом порядке.

Чтобы не прерывать изложения глав длинными замечаниями, мы прибегли к введению приложений. Название «Приложение» не должно вызывать недоразумений; нередко в них мы останавливаемся на важных моментах.

Мы рассчитываем на то, что читатель проделает упражнения, предлагаемые в конце каждой главы, или по крайней мере ознакомится с ними, прежде чем приступить к следующим главам. В некоторых упор делается на порядок величин и дается качественный ответ, уточняемый в дальнейшем.

Цитируемая нами литература комментируется в конце второго тома. Она неодинакова по трудности. Ссылки, рекомендуемые будущим специалистам, снабжены стоящей впереди буквой (с).

Часть первая

СУБАТОМНАЯ ФИЗИКА НА УРОВНЕ КАЧЕСТВЕННОГО ОПИСАНИЯ

Никого уже не удивишь, сказав, что атом состоит из ядра и вращающихся вокруг него электронов. Вам, вероятно, хорошо знакома такая картина: маленький шарик радиусом примерно 10^{-8} см, внутри которого находится крошечный объект, массивный и загадочный, удерживающий движущиеся электроны. Это — ядро. Оно очень мало с точки зрения атомных масштабов: ему можно приписать радиус порядка 10^{-13} — 10^{-12} см. С атомных расстояний ядро выглядит как горошина на расстоянии 100 м. Оно массивно: в нем одно сосредоточена почти вся масса атома; даже самое легкое ядро, протон, почти в 2000 раз тяжелее электрона. Ядро — хранитель тайн: ему мы обязаны открытием двух новых типов взаимодействия: сильного, которое обеспечивает сцепление его частей, и слабого, ответственного за β -распад. А после взрыва первых атомных бомб атом в некоторых популярных статьях изображался как некий «грозный сгусток пустоты», вызывая восторженное изумление и обывателя, и философа.

По существу в виде такой наивной картины ядро входит в описание конденсированных сред и даже атома. Между тем в течение более чем полувека ядерная физика хранила, да и хранит еще поныне достаточно сюрпризов для занимающихся ею всерьез. Сегодня она возвращается вновь к своему первоначальному назначению и сосредоточивает свое внимание на изучении в первую очередь структуры атомных ядер. Попутно она дала рождение физике высоких энергий, которая занимается специально трактовкой проблем, возникающих в связи с открытием значительного числа так называемых «элементарных» частиц, наиболее знакомыми примерами которых являются протон и нейтрон. Если атомы — это составные части твердых, жидких и газообразных веществ, то названные элементарные частицы — составные части атомного ядра. Итак, субатомная физика включает два раздела, отличающихся, вообще говоря, друг от друга в такой же мере, как атомная физика и физика твердого тела. Это — физика атомного ядра, или ядерная физика, и физика элементарных частиц, называемая еще физикой высоких энергий. Их задачи мы определим, рассмотрев прежде всего сильное и слабое взаимодействия.

В данной первой части книги мы будем предполагать, что читатель имеет некоторые общие представления об основах квантовой механики, но еще не владеет ни аппаратом, ни техникой вычисле-

ний ¹⁾. Отсутствие последних имеет, однако, не только отрицательные стороны. Действительно, это дает нам возможность ввести терминологию, указать место различных проблем, характер методов и порядок встречающихся в субатомной физике величин, не давая при этом главному утонуть в математическом формализме.

Мы вынуждены были иногда упрощать изложение до карикатуры. В частности, явление столкновения, хлеб насущный субатомной физики, излагается на основе аналогии с дифракцией. Когда же принятый стиль популяризации начинает терять смысл, мы отмечаем это в тексте и просим читателя потерпеть до последующих глав, чтобы исправить свои первые впечатления.

¹⁾ Важнейшие понятия квантовой физики вводятся в тексте по мере необходимости, но места, напечатанные мелким шрифтом, при первом чтении можно пропускать.

КАК НАБЛЮДАТЬ ВНУТРИАТОМНЫЕ ОБЪЕКТЫ

В этой главе мы напомним, как было открыто атомное ядро, и остановимся на наиболее распространенном методе изучения субатомных систем, состоящем в зондировании вещества бомбардирующими частицами. Анализ результатов измерения приведет нас к введению понятия эффективного сечения и амплитуды рассеяния.

§ 1. Состав ядра

После открытия атомного ядра (в 1911 г. Резерфордом) существенным фактором прогресса был ряд неверных гипотез о природе его составных частей [1]. Наблюдение α распада создавало впечатление, что ядро — это система α -частиц. Но наибольшее признание получила модель, приписывающая ядру два типа составных частей: протоны и электроны. Ядерные массы в первом приближении равны целому числу масс протона, и поэтому для получения массового числа естественно было предположить наличие в ядре A протонов. Но атомный номер Z меньше A , и, следовательно, для нейтрализации части заряда протонов в ядро данного элемента необходимо ввести $A - Z$ электронов. Поскольку же протон и электрон имеют противоположные заряды, а масса электрона пренебрежимо мала по сравнению с массой протона, тем самым воспроизводились две важнейшие характеристики атомных ядер. Тем не менее оставалось еще немало противоречий (упр. 1.1), из которых наиболее явным было то, что у ядра ^{14}N наблюдается целочисленный угловой момент. Действительно, согласно электронно-протонной модели, такое ядро должно содержать 14 протонов и 7 электронов, т. е. нечетное число частиц с полуцелым спином¹⁾, а поэтому ожидалось, что полный угловой момент этого ядра будет полуцелым, тогда как эксперимент это опровергал [1].

1932 год ознаменовался решительным поворотом в ядерной физике: был открыт нейтрон, что позволило сразу разрешить всю совокупность противоречий, вытекающих из экспериментальных данных. Начиная с 1930 г. в ряде экспериментов было доказано

¹⁾ Будем пока что представлять себе спин как собственный угловой момент. Он также измеряется в единицах $\hbar$, где $\hbar$ есть постоянная Планка h , деленная на 2π . Частицы с полуцелым спином называются фермионами, так как они подчиняются статистике Ферми — Дирака (приложение 4) Частицы с целым спином называются бозонами, они подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна.

существование проникающего излучения, отличного по своей природе от γ -излучения. Заслугой Чедвика было то, что он выдвинул гипотезу о существовании новой частицы — нейтрона и установил свойства этого, как выяснилось, столь нужного незнакомца.

Для физиков-ядерщиков протон и нейтрон — это частицы одного семейства нуклонов ¹⁾. Их массы очень близки и почти в 2000 раз больше массы электрона. Оба они имеют спин $1/2$. Фундаментальное различие между ними — в их зарядовых состояниях: в то время как заряд протона равен $+e$, нейтрон нейтрален. На основе этих характеристик можно, не привлекая никаких других составных частей ядра, кроме протона и нейтрона, согласовать друг с другом все экспериментальные наблюдения. В частности, ядро ${}^{14}_7\text{N}$, образованное из 7 протонов и 7 нейтронов, т. е. из четного числа частиц со спином $1/2$, действительно должно иметь целый угловой момент [1].

Таблица 1.1

Свойства нуклонов

Символ	Z	Спин в единицах $\hbar$	M_0c^2 , МэВ
p	$+e$	$1/2$	938,28
n	0	$1/2$	939,57

Итак, после открытия нейтрона ядро с массовым числом A и атомным номером Z рассматривается как система Z протонов и N нейтронов, причем $Z+N=A$. В табл. 1.1 собраны все указанные выше характеристики. Массы покоя выражены в энергетических единицах в соответствии с соотношением $E=M_0c^2$, что составляет 0,511 МэВ для электрона ²⁾. В ядерной физике используется единица 1 МэВ, равная 10^6 эВ (1 электронвольт = $1,6 \cdot 10^{-19}$ джоулей). Заметим, что в единицах СИ масса протона составляет $1,67261 \cdot 10^{-27}$ кг.

§ 2. Модель Резерфорда

Напомним теперь главные выводы из так называемых опытов Резерфорда (правильнее было бы говорить Гейгера и Марсдена [1]), остановившись особо на методе, который позволил их полу-

¹⁾ Нейтронно-протонная модель ядра была предложена в 1932 г. независимо Д. Д. Иваненко и В. Гейзенбергом. С историей вопроса читатель может познакомиться в книге [142]. Там же имеются переводы на русский язык важнейших оригинальных статей по этим вопросам. — *Прим. перев.*

²⁾ В дальнейшем автор использует для массы кроме обычных массовых единиц $\text{МэВ}/c^2$ также энергетические единицы МэВ. — *Прим. перев.*

чить. Метод этот широко используется в субатомной физике и состоит в том, что на мишень направляют пучок частиц и измеряют угловое распределение рассеянных частиц. Анализ результатов такого эксперимента, проводимый на основе разумных гипотез, дает ценные сведения о природе взаимодействия, вызывающего отклонение частиц первичного пучка. Все это выглядит так же, как просвечивание мишени рентгеновскими лучами с последующей интерпретацией полученной рентгенограммы.

В экспериментах Резерфорда производилась «флюорография» атомов тонкой золотой мишени. Тонкой мишень должна быть для того, чтобы мы могли быть уверенными в том, что падающая частица взаимодействует практически лишь с одним ядром. В противном случае пришлось бы иметь дело с явлением многократных столкновений, и тогда анализ процесса уже не был бы элементарным. В качестве ядер-снарядов использовались в то время α -частицы радиоактивных источников (ядра ${}^4_2\text{He}$). Их кинетическая энергия всегда строго определенная, и, подбирая источник, ее можно было варьировать в пределах от 4 до 9 МэВ в зависимости от типа используемых источников. Такой энергии достаточно для прохождения пучка через тонкую мишень при условии, что эксперимент проводится в вакууме. В противном случае слой воздуха вдоль траектории пучка значительно замедлял бы падающие и рассеянные α -частицы, что усложняло бы анализ и даже могло привести к остановке частиц до их регистрации. Поэтому опыты проводились в вакууме.

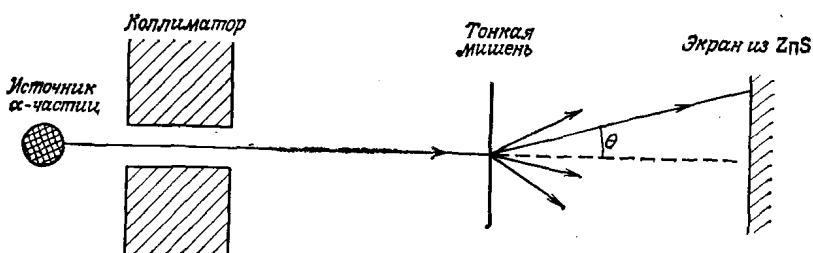


РИС. 1.1. Частицы рассеиваются во всех направлениях с разной вероятностью, зависящей от угла θ .

Пучок частиц вырезался коллиматором и направлялся на тонкую мишень. Рассеянные α -частицы регистрировались, как это было тогда принято, с помощью экрана из сернистого цинка. Он располагался достаточно далеко от мишени, так, чтобы можно было точнее измерить угол рассеяния θ (рис. 1.1). Использование ZnS в качестве материала детектора основывалось на его свойстве сцинтиллировать при ударе частицы, что позволяло визуально наблюдать рассеянные частицы и подсчитывать события.

В 1909 г. Гейгер и Марсден обратили внимание на то, что отклонение α -частиц, рассеянных на тонких золотых и платиновых фольгах, не согласуется с моделью Томсона, которая трактовала атом как систему размером примерно 10^{-8} см с равномерным распределением заряда. Для разрешения возникающей проблемы Резерфорд предложил в 1911 г. модель атома с центральным ядром. Воспроизводя анализ результатов экспериментов, мы станем на корпускулярную точку зрения и предположим, что выполнены условия, при которых присутствие атомных электронов существенно не влияет на траекторию частиц, значительно более тяжелых (гл. 4, § 2). Тем самым мы принимаем, что основное влияние на отклонение α -частиц оказывает центральное тело — ядро с зарядом Z ($Z = 79$ в случае золота).

В рамках этой гипотезы можно, не проводя каких-либо вычислений, убедиться в том, что такие эксперименты позволяют сделать выбор между моделями Томсона и Резерфорда. С этой целью оценим наименьшее расстояние a , на которое α -частица с кинетической энергией E_α может приблизиться к ядру с зарядом Ze . Это расстояние, называемое «расстоянием наибольшего сближения», определяется соотношением (в системе СГС)

$$E_\alpha = \frac{2Ze^2}{a}. \quad (1.1)$$

На таком расстоянии a от центра ядра энергия кулоновского отталкивания α -частицы с зарядом $2e$ равна кинетической энергии E_α (после этого α -частица возвращается назад, т. е. мы имеем дело с так называемым обратным рассеянием, или с рассеянием на 180°). Обратив это соотношение, в случае золота при $E_\alpha \approx 5$ МэВ, получим ¹⁾ $a = 2Ze^2/E_\alpha \approx 4,5 \cdot 10^{-12}$ см. Это расстояние гораздо меньше атомных размеров, и поэтому энергии α -частиц, равной 5 МэВ, уже достаточно для проверки наличия ядра внутри атома.

§ 3. Эффективное сечение

Результаты опыта Резерфорда, да и вообще всех экспериментов по столкновению частиц выражаются через эффективные сечения. Поэтому, прежде чем двигаться дальше, нам следует определить это понятие.

¹⁾ Вычисления в ядерной физике существенно упрощаются при введении двух весьма удобных численных констант. Одна из них — постоянная тонкой структуры $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$ (в системе СИ величина α записывается как $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) = 1/137$; это — безразмерная величина); другая величина $\hbar c/(197 \text{ МэВ}) = 10^{-13}$ см. Попытаемся запомнить эти две величины, чтобы иметь возможность быстро оценивать порядок величин. Например, оценим расстояние наибольшего сближения:

$$a = \frac{2Ze^2}{E_\alpha} = zZ \frac{e^2}{\hbar c} \frac{\hbar c}{197} \frac{197}{E_\alpha} = 2 \cdot 79 \cdot \frac{1}{137} \cdot 10^{-13} \cdot \frac{197}{5} \approx 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ см.}$$

А. Измерение эффективных сечений

В экспериментах по столкновению используются три статистических ансамбля, которые предполагаются распознаваемыми: пучок, мишень, детектор. Схема опыта показана на рис. 1.2. При этом предполагается, что выполнены следующие идеальные условия.

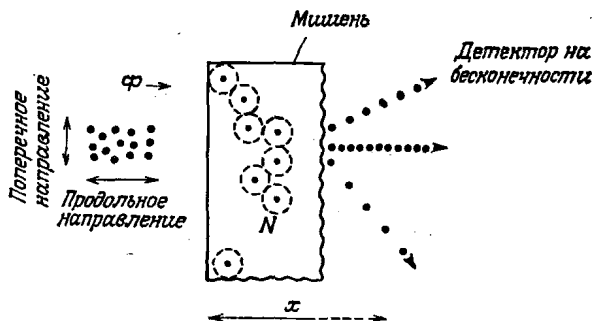


РИС. 1.2. Схема эксперимента.

1. Частицы падающего пучка являются тождественными и разделены во времени (в продольном направлении) и в пространстве (в поперечном направлении). Только при таких условиях можно быть уверенным, что частицы будут взаимодействовать одна после другой независимо. Это условие необходимо также для того, чтобы детектор не регистрировал сразу более одной частицы и функционировал правильно с точки зрения электронных импульсов. Чтобы все падающие частицы попадали на мишень, пучок должен быть уже мишени. Его интенсивность характеризуется числом частиц, достигающих мишени в единицу времени.

2. Мишень должна быть достаточно химически однородной, чтобы можно было считать, что все N рассеивающих центров, приходящихся на 1 см^2 , являются идентичными. Рассеивающие центры должны пространственно располагаться достаточно далеко друг от друга, чтобы каждая частица пучка взаимодействовала лишь с одним из них. В случае рассеяния на ядрах с точки зрения чисто классической корпускулярной теории рассеивающие центры никогда не могут соприкасаться, так как ядра отделены друг от друга атомными расстояниями, «астрономически большими» в ядерном масштабе. Площадка, соответствующая ядру, — величина порядка 10^{-24} см^2 , тогда как для атома она порядка 10^{-16} см^2 .

Кроме того, чтобы не иметь дела с трудно анализируемым процессом многократного рассеяния и быть практически уверенным в том, что каждая частица, зарегистрированная под углом θ , испытала в мишени столкновение с ядром лишь один раз, толщина мишени x должна быть мала. Эти условия обеспечивают линейную