

ПРОХОЖДЕНИЕ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

§ 1. Вводные замечания

1. Целью этой главы является ответ на вопрос о том, что происходит при прохождении потока заряженных микрочастиц или γ -квантов через различные вещества. Вопрос естественно распадается на два:

а) Что произойдет с частицами (какое расстояние они пройдут, куда денутся и т. д.)?

б) Что произойдет с веществом (ионизация, появление вторичной радиоактивности, ...)?

На первый вопрос мы здесь ответим полностью. Что же касается второго вопроса, то мы рассмотрим лишь непосредственно относящиеся к ядерной физике явления ионизации среды и вторичной активности в ней. Другие воздействия излучений, такие, как изменения структуры, прочности и т. д., будут рассмотрены в гл. XIII. О биологическом действии излучений мы расскажем также в гл. XIII.

Очевидно, что процессы, возникающие при прохождении частиц через вещество, имеют исключительно важное практическое значение как для самой ядерной физики, так и для соприкасающихся с ней областей науки и техники. Без хорошего знания этих процессов нельзя понять методов регистрации ядерных частиц или, например, рассчитать толщину бетонной стены для радиационной защиты от ядерных излучений ускорителя частиц.

2. Мы будем рассматривать прохождение таких заряженных частиц и γ -квантов, энергии которых на несколько или на много порядков превышают среднюю энергию связи электронов в атомах, называемую *средним ионизационным потенциалом* I . Для величины I выполняется эмпирическое соотношение

$$I \approx 13,5 \cdot Z \text{ эВ.} \quad (8.1)$$

Таким образом, мы будем рассматривать прохождение через вещество частиц с энергиями от 0,01—0,1 МэВ и выше вплоть до тысяч ГэВ. Наибольший практический интерес представляет интервал энергий от нескольких кэВ до 10 МэВ. Энергии проходящих

через вещество частиц во всей этой области мы будем здесь называть высокими, подразумевая при этом, что они велики по сравнению с I .

3. Общая картина прохождения частиц высокой энергии через вещество крайне сложна. Частицы сталкиваются с электронами, находящимися на различных оболочках, рассеиваются кулоновскими полями ядер, а при достаточно больших энергиях вызывают и различные ядерные реакции. Кроме того, при достаточно высоких энергиях ядерных неизбежно возникают разнообразные вторичные эффекты. Например, как мы увидим ниже, пучок высокоэнергичных электронов порождает в веществе мощный поток вторичных γ -квантов, который необходимо учитывать при расчете, скажем, радиационной защиты. Это, однако, вовсе не значит, что процессы прохождения через вещество совершенно не поддаются расчету. Целый ряд важнейших величин, характеризующих эти процессы, удастся довольно точно рассчитать или хотя бы оценить. Этому способствуют следующие причины.

Во-первых, при прохождении заряженных частиц и γ -квантов через вещество основную роль играют хорошо изученные электромагнитные взаимодействия. Роль ядерных взаимодействий в большинстве случаев мала из-за короткодействия ядерных сил, а также из-за того, что электронов в веществе гораздо больше, чем ядер. Поэтому мы в этой главе будем в основном изучать электромагнитные взаимодействия частиц с веществом. Только в §§ 5 и 6 мы немного коснемся роли ядерных взаимодействий.

Второе серьезное упрощение возникает за счет того, что энергия проходящих частиц значительно превышает энергию связи электронов в атомах. Это часто позволяет пренебрегать энергиями связи электронов вещества с атомами, т. е. трактовать эти электроны как свободные в момент столкновения с проходящей частицей. Там, где это существенно, взаимодействие электронов с ядрами часто можно с хорошей точностью учесть, считая, что каждый электрон имеет энергию связи, равную среднему ионизационному потенциалу (8.1). Ниже при рассмотрении конкретных процессов мы увидим, что возможны и дополнительные достаточно реалистичные упрощающие предположения, справедливые для отдельных конкретных процессов.

Многие величины, определяющие процесс прохождения, не поддаются точному расчету из-за сложности физической картины. Такие величины приходится находить опытным путем. Но даже в этом случае необходимо хотя бы качественно понять основной механизм процесса, чтобы знать, какие именно экспериментальные константы надо определить, чтобы получить нужную информацию о процессах такого рода.

4. Посмотрим теперь, какие факторы определяют течение процесса прохождения частиц через вещество. Из рассуждений преды-

дущего параграфа следует, что основную роль должны играть следующие характеристики частиц и вещества:

масса	}	частицы,
заряд		
энергия		
плотность	}	вещества.
атомный номер		
средний ионизаци-		
онный потенциал		

Заметим, что здесь перечислены далеко не все свойства частиц и вещества. Для процессов прохождения несущественны, например, спин частицы, температура, твердость вещества (защиты из графита и алмаза эквивалентны).

5. Из-за преобладающей роли электромагнитных процессов прохождения заряженных частиц и γ -квантов через вещество является разделом скорее атомной, чем ядерной физики. Но падающие частицы обладают энергиями, характерными для ядерной физики. Поэтому с процессами прохождения исследователи сталкиваются при изучении или использовании ядерных излучений.

6. По механизму прохождения через вещество исследуемые нами частицы можно разбить на три группы: 1) тяжелые заряженные частицы; 2) легкие заряженные частицы и 3) γ -кванты. К легким заряженным частицам мы относим электроны и позитроны, к тяжелым — все остальные. При переходе от одной группы частиц к другой характер прохождения качественно меняется.

7. Для других (отличных от γ -квантов) нейтральных частиц электромагнитное взаимодействие либо полностью отсутствует (для нейтрино), либо очень мало. Огромный практический интерес представляет взаимодействие с веществом интенсивных потоков нейтронов. Эти процессы в основном не атомные, а ядерные. Они будут рассмотрены в гл. X и XI. Нейтрино подвержены только слабым взаимодействиям, так что эти частицы могут свободно проходить в веществе астрономические расстояния. Поэтому вопрос о прохождении потоков нейтрино через вещество интересен главным образом для астрофизики и будет рассмотрен в гл. XII, § 1.

§ 2. Прохождение тяжелых заряженных частиц через вещество

1. Основной механизм взаимодействия тяжелых заряженных частиц высокой энергии с веществом таков. Частица, пролетая сквозь вещество, «расталкивает» атомные электроны своим кулоновским полем. За счет этого частица постепенно теряет энергию, а атомы либо ионизируются, либо возбуждаются. Растеряв свою энергию,