

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Масштабы физических величин в ядерной физике

1. В ядерной физике в широком смысле этого термина изучаются явления, происходящие на очень малых расстояниях и при очень больших энергиях, приходящихся на одну частицу. Верхней границей расстояний, на которых происходят события, изучаемые ядерной физикой, является размер атома, т. е. примерно 10^{-8} см. Нижней границей энергий отдельных микрочастиц можно считать энергию связи электрона в атоме, т. е. примерно 10^{-10} — 10^{-11} эрг. В этом смысле ядерная физика является физикой субатомных явлений.

Для нижней границы расстояний и для верхней границы энергий на частицу до настоящего времени не установлено каких-либо естественных значений. Обе эти границы определяются возможностями экспериментальной техники и с ее развитием постепенно смещаются. Сейчас (конец 1978 г.) минимальные доступные измерения длины имеют порядок примерно 10^{-15} см, т. е. на семь порядков меньше размеров атома. Максимальная полученная человеком энергия на частицу составляет 0,8 эрг. Это, конечно, мало для макроскопического тела, но очень и очень много для одной элементарной частицы. Для сравнения укажем, что в спутнике, летящем со скоростью порядка 1 км/с, на один протон приходится энергия 10^{-14} эрг.

В космических лучах иногда удается зарегистрировать частицы с энергиями до 10^6 — 10^7 эрг. Здесь, однако, мы имеем дело не с контролируемым и планируемым опытом, как на ускорителе, а с наблюдаемым случайным природным явлением, причем зачастую довольно редким.

Мы видим, что ядерная физика в ее существующем виде охватывает огромные области масштабов — семь порядков по расстояниям и десять порядков по энергии.

2. Во всей области масштабов ядерной физики вещество встречается только в двух формах: в форме атомных ядер и в форме элементарных частиц. Как мы увидим ниже, это не мешает миру ядерной физики быть не менее интересным и многообразным, чем мир атомной физики, мир агрегатных состояний вещества и мир астрономических масштабов.

3. Рассмотрим немного подробнее шкалу расстояний и связанную с ней шкалу времен.

Начнем с единиц измерения. Основной единицей времени во всей физике, в том числе и в ядерной, является секунда. В ядерной технике часто используются очень малые доли секунды: микросекунда ($1 \text{ мкс} = 10^{-6} \text{ с}$) и наносекунда ($1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$). Несколько больший разбой имеется в единицах длины. Рекомендованной в 1963 г. в качестве предпочтительной является международная система единиц СИ, в которой длина измеряется в метрах. Но в подавляющем большинстве статей, монографий и учебных пособий по ядерной физике используется система СГС с единицей длины сантиметр. После некоторых раздумий мы решили следовать этой традиции, учтя, что большинство физиков, с которыми мы обсуждали этот вопрос, считают неестественным приписывание вакууму в системе СИ диэлектрической и магнитной проницаемостей, отличных от единицы. Кроме сантиметра, в ядерной физике часто используется внесистемная единица — ферми:

$$1 \text{ ферми} = 10^{-13} \text{ см} = 10^{-15} \text{ м.}$$

Эта единица удобна тем, что она по порядку величины близка к размерам атомных ядер, подобно тому как применяемая в атомной физике внесистемная единица ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$) по порядку величины близка к размерам атомов.

На рис. 1.1 изображена в логарифмическом масштабе шкала различных характерных длин в ядерной физике. Расстояниям порядка 10^{-11} см соответствуют процессы взаимодействия γ -квантов с электронами и их двойниками — позитронами (см. гл. VII, § 6, а также гл. VIII, § 4). Например, такие расстояния характерны для комптон-эффекта — рассеяния γ -квантов на электронах. Между 10^{-12} и 10^{-13} см располагаются радиусы атомных ядер. Размеры примерно 10^{-13} см имеют протоны и нейтроны — частицы, из которых составлены атомные ядра. Такого же порядка размеры имеет и большинство других элементарных частиц (пионы, каоны, гипероны, ...). Этим же расстоянием определяется радиус действия сил между протонами, нейтронами и большинством других элементарных частиц. Поэтому длина 1 ферми $= 10^{-13} \text{ см}$ является самым характерным расстоянием для всей ядерной физики. Отметим, что не все элементарные частицы имеют размеры порядка 10^{-13} см . Радиусы электронов и некоторых других частиц столь малы, что до сих пор не поддаются наблюдению.

Как мы увидим ниже в § 3, для исследования структуры вещества на очень малых расстояниях нужны частицы очень высоких энергий. Обстреливая протоны и нейтроны пучками частиц очень высоких энергий, удалось получить некоторые сведения о структуре протонов и нейтронов до расстояний, приближающихся к 10^{-15} см . О том, как устроен мир на меньших расстояниях, сейчас опытных данных нет.

Со шкалой расстояний тесно связана шкала времен. Важнейшим масштабным понятием в ядерной физике является *характерное время*, или, что то же самое, *время пролета*. Так называют время,

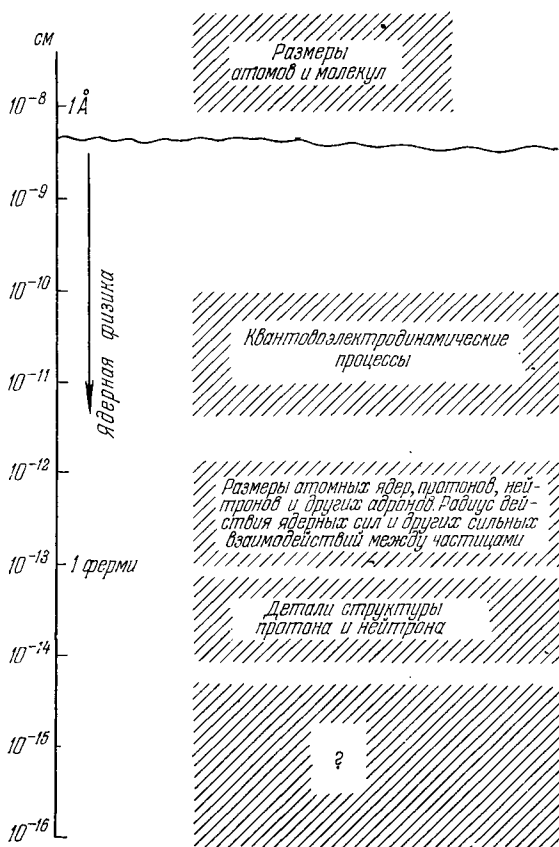


Рис. 1.1. Шкала расстояний в ядерной физике.

необходимое для пролета частицы определенной энергии сквозь другую микрочастицу. Например, радиус R ядра имеет порядок $5 \cdot 10^{-13}$ см, а скорости v протонов и нейтронов в нем составляют примерно 10^9 см/с ($1/30$ скорости света). Отсюда для ядерного времени пролета получается значение

$$\tau_{\text{ядерн}} = \frac{R}{v} = 5 \cdot 10^{-22} \text{ с.} \quad (1.1)$$

Поэтому для атомного ядра большими являются времена $t \gg 10^{-22}$ с и малыми $t < 10^{-22}$ с. Мы не раз будем пользоваться ядерным временем пролета в гл. II и IV.

При очень высоких энергиях скорости частиц приближаются к предельно возможной $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с, т. е. скорости света в вакууме. Поэтому для большинства элементарных частиц, радиусы которых имеют порядок 10^{-13} см, время пролета равно

$$\tau_{\text{эле}} = 3 \cdot 10^{-24} \text{ с.} \quad (1.2)$$

Время $\tau_{\text{эле}}$ определяет естественный масштаб времени в большинстве процессов физики элементарных частиц. Например, нейтральный пион π^0 , распадающийся через 10^{-16} с после образования, следует считать очень долго живущей частицей с точки зрения масштабов времени в физике элементарных частиц.

Непосредственно радиотехническими методами измеряются времена до 10^{-9} с (в отдельных случаях до 10^{-11} с). Пользуясь соотношением неопределенностей время-энергия (см. § 3, п. 3, а также гл. IV, § 5), можно косвенно измерять и значительно меньшие времена вплоть до $\tau_{\text{ядерн}}$ и $\tau_{\text{эле}}$. Физикам-ядерщикам нередко приходится иметь дело с микроскопическими и даже астрономическими временами. Элементарная частица нейтрон в свободном состоянии «живет» 10^3 с небольшим секунд, а ядро урана претерпевает ядерный распад, лишь прожив в среднем $5 \cdot 10^9$ лет.

4. Перейдем теперь к шкалам энергий и масс.

Для энергии во всей ядерной физике используется только одна, причем внесистемная, единица — электронвольт (эВ):

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Энергии порядка 1 эВ характерны для атомной физики, а для ядерной слишком малы. Поэтому используются производные единицы: килоэлектронвольт (1 кэВ = 10^3 эВ), мегаэлектронвольт (1 МэВ = 10^6 эВ), гигаэлектронвольт (1 ГэВ = 10^9 эВ) и тераэлектронвольт (1 ТэВ = 10^{12} эВ).

Для атомных ядер наиболее характерны энергии порядка 1 МэВ. Например, энергия в несколько мегаэлектронвольт (около десяти) обычно нужна для того, чтобы вырвать из ядра один протон или нейтрон. В отдельных случаях в ядерной физике приходится иметь дело с более низкими энергиями. Так, вылетающие из ядра γ -кванты часто имеют энергии порядка сотни и даже десятка кэВ, а иногда и ниже. При энергиях столкновения выше 1 МэВ становится возможным рождение электронов (в паре с позитронами). При энергиях столкновения до 150 МэВ происходит энергичное разрушение атомных ядер, но составляющие их элементарные частицы остаются неизменными. При энергиях столкновения выше 150 МэВ начинается рождение новых частиц, сначала сравнительно легких (пионы), а затем все более и более тяжелых.

Массы атомных ядер и элементарных частиц варьируются в следующих пределах. Известны ядра с массами от $2 \cdot 10^{-24}$ до $5 \cdot 10^{-22}$ г. Известны элементарные частицы с массами от 10^{-27} г (электрон) до примерно $1,7 \cdot 10^{-23}$ г (резонанс в системе $e^+ - e^-$ при энергии 9,6 ГэВ). Кроме того, существуют частицы (γ -квант и, по-видимому, нейтрино), массы которых точно равны нулю. Что такое частицы нулевой массы, будет объяснено ниже в § 2, п. 6.

В качестве единицы массы для ядер часто используется атомная единица массы (а. е. м.), определение которой мы дадим в гл. II, § 3. Массы элементарных частиц часто измеряются в энергетических единицах, о чем мы скажем в § 2, п. 2.

§ 2. Релятивистские свойства частиц

1. При больших скоростях и высоких энергиях частиц ньютоновская механика перестает быть справедливой и должна быть заменена более точной механикой теории относительности, или, что то же самое, релятивистской механикой. Специфичные для релятивистской механики свойства частиц и физических величин называются *релятивистскими свойствами*.

Важнейшей для теории относительности константой является скорость света в вакууме, обозначаемая через c :

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с.}$$

Согласно теории относительности скорость c является предельной. Ни один физический объект не может двигаться со скоростью, превышающей c .

Релятивистские эффекты малы, если скорости v всех физических объектов малы по сравнению с c , а энергии этих объектов малы по сравнению с Mc^2 , где M — масса объекта:

$$v_{\text{нерел}} \ll c, \quad E_{\text{нерел}} \ll Mc^2 \left\{ \begin{array}{l} \text{условия малости реляти-} \\ \text{вистских эффектов.} \end{array} \right. \quad (1.3)$$

Первое из этих неравенств часто используется в форме $v \ll c$.

Когда величины v/c и E/Mc^2 хотя и малы по сравнению с единицей, но все же не пренебрежимо малы (например, порядка 0,1%), то можно наблюдать релятивистские поправки при сравнении с опытом результатов нерелятивистских расчетов. С такой ситуацией мы сталкиваемся в физике атомного ядра. Если же эти величины имеют порядок единицы, то соответствующий процесс будет существенно релятивистским. Такие процессы обычны для физики элементарных частиц.

В теории относительности основным является коренное изменение свойств пространства и времени при больших скоростях. Однако подробное изложение этой теории не входит в программу нашей книги. Поэтому мы ограничимся сводкой нужных для даль-