

между массами электрона и протона («мезо» — средний, промежуточный).

Если предположить, что между нуклонами в ядре происходит обмен виртуальными π -мезонами, можно объяснить короткодействующий характер ядерных сил. π -Мезон обладает не равной нулю массой покоя m_π (см. § 19.4). Время Δt , в течение которого может происходить обмен нуклонов π -мезонами¹, не должно превышать величины, определяемой соотношением неопределенностей Гейзенберга $\Delta t \geq \frac{\hbar}{\Delta W}$. Величина ΔW неопределенности в значении энергии нуклона, очевидно, должна быть связана с зарождением вблизи нуклона в области радиуса действия ядерных сил новой частицы, обладающей энергией покоя $W_\pi = m_\pi c^2$. Таким образом, $\Delta W \geq W_\pi$. Считая, что $\Delta W = W_\pi$, имеем $\Delta t \approx \hbar / (m_\pi c^2)$. Если считать, что π -мезон удаляется от нуклона со скоростью v_π , близкой к скорости c света в вакууме, то он пройдет за время Δt расстояние

$$R_\pi = v_\pi \Delta t \approx c \frac{\hbar}{m_\pi c^2} \approx \frac{\hbar}{m_\pi c}.$$

Таким образом, R_π равно комптоновской длине волны π -мезона (см. § 11.4). Предполагая, что за время Δt π -мезон проходит расстояние $R_\pi = R$, равное примерно радиусу действия ядерных сил ($R \approx 1,5 \cdot 10^{-15}$ м), можно подсчитать массу π -мезона: $m_\pi = \hbar / (R_\pi c)$. Расчет показывает, что $m_\pi \approx 250 m_e$, где m_e — масса покоя электрона. Это находится в согласии с измеренными массами π -мезонов (см. § 19.4).

Заметим, что с этой точки зрения электромагнитное поле, в котором взаимодействие осуществляется с помощью обмена виртуальными фотонами, имеет бесконечно большой радиус действия. В самом деле, масса покоя фотона $m_{0\phi} = 0$, поэтому расстояние, на которое может распространяться фотон (если он не поглощен), равно по предыдущей формуле бесконечности:

$$R_\phi = \frac{\hbar}{m_{0\phi} c} \rightarrow \infty.$$

Описав важнейшие свойства ядерных сил, укажем в заключение, что в современной ядерной физике продолжается изучение их природы.

§ 16.6. Размеры ядер

1. Из опытов Резерфорда по рассеянию α -частиц веществом были получены первые данные о размерах той области пространства, которую занимает ядро. Точнее, было установлено, что на расстоянии, меньшее некоторой величины при данной энергии α -частицы, эта частица не может приблизиться к ядру вследствие действия на нее кулоновских сил отталкивания со стороны положительно заряженного ядра. Однако теперь мы знаем, что в ядре действуют два типа сил —

¹ Промежуток времени от испускания π -мезона одним нуклоном до поглощения его другим.

ядерные силы притяжения между нуклонами и кулоновские силы отталкивания между протонами. При этом кулоновские силы действуют на значительно больших расстояниях между протонами, чем радиус действия ядерных сил. Устойчивость ядер означает, что ядерные силы притяжения превышают кулоновские силы отталкивания и в итоге их совместного действия ядро занимает некоторую область пространства, которую следует считать **размерами ядра**.

2. Размеры ядра можно определить как область пространства в атоме, вне которой не действуют специфические ядерные силы притяжения между нуклонами. При определении размеров ядра нужно учесть, что ядро является системой частиц, подчиняющихся квантовой механике и, следовательно, соотношению неопределенностей Гейзенберга. Вследствие этого размеры области, в которой находятся ядерные частицы, могут быть заданы лишь с точностью, допускаемой этим соотношением. Другими словами, границы области, называемой размерами ядра, по необходимости «размыты»¹.

3. Имеется ряд методов, позволяющих оценить размеры ядра. Все они при некотором различии численных коэффициентов дают один порядок величины для линейных размеров области пространства, занимаемого ядром.

Размеры ядра могут быть оценены из данных по рассеянию ядрами быстрых нейтронов. На рис. 16.5 приведена найденная этим методом зависимость радиусов ядер R от $A^{1/3}$, где A — массовое число. Наиболее тяжелые ядра, например Pb, U, имеют «поперечные» сечения около $3 \cdot 10^{-28}$ м², а их радиусы приближаются по порядку величины к 10^{-14} м. Все методы оценки размеров ядер дали значения радиусов ядер, хорошо описываемые эмпирической формулой

$$R = r_0 A^{1/3}, \quad (16.10)$$

где $r_0 = (1,4 \div 1,5) \cdot 10^{-15}$ м.

5. Пользуясь формулой (16.10), можно подсчитать среднюю плотность ρ ядерного вещества. Предполагая, что ядро имеет форму сферы с радиусом R , имеем

$$\rho = \frac{M_{\text{я}}}{\frac{4}{3} \pi R^3}. \quad (16.11)$$

Здесь $M_{\text{я}}$ — масса ядра. Если принять массу ядра $M_{\text{я}} = m_n A$, где m_n —

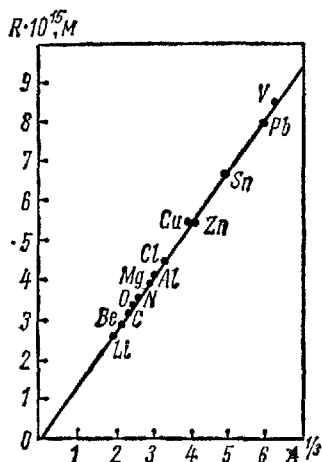


Рис. 16.5

¹ Это в полной мере относится также и к оценке области пространства, занимаемой электронами в атоме, т. е. к определению размеров атома в целом.

масса нейтрона, то

$$\rho = \frac{1,673 \cdot 10^{-27}}{\frac{4}{3} \pi (1,5 \cdot 10^{-15})^3} \text{ кг/м}^3 \cong 1,3 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3.$$

Результат показывает, что плотность ядерного вещества колоссальна — она не идет ни в какое сравнение с плотностями обычных веществ, состоящих из атомов химических элементов и их соединений.

§ 16.7. Модели ядра

1. Отсутствие точных знаний о характере ядерных сил притяжения между нуклонами заставило идти в теоретических исследованиях по пути отыскания таких моделей ядра, которые, правильно отражая важнейшие его свойства, допускали бы возможность количественного расчета характеризующих ядро величин. Первой моделью ядра была *капельная модель*, предложенная Я. И. Френкелем (1936) и развитая Бором и др. В основе капельной модели ядра лежит аналогия между свойствами ядра и каплей жидкости. Так, подобно короткодействующим ядерным силам, силы взаимодействия молекул жидкости имеют малый радиус действия. Ядерные силы, как и силы, действующие между молекулами жидкости, обладают свойствами насыщения. Далее, для капли жидкости характерна постоянная плотность ее вещества (при заданных внешних условиях — температуре и давлении), не зависящая от числа частиц, входящих в каплю. Как известно, ядро имеет приблизительно постоянную удельную энергию связи и постоянную плотность, не зависящую от числа нуклонов в ядре. Наконец, аналогия между ядром и жидкой каплей проявляется в том, что в обоих случаях наблюдается определенная подвижность составляющих каплю молекул и входящих в ядро нуклонов. Последнее свойство нуклонов проявляется в наличии у них орбитальных моментов импульса. Нужно, однако, сразу же заметить, что ядро-каплю следует считать *з а р я ж е н н о й* и подчиняющейся законам квантовой механики. Этим ядро существенно отличается от капли жидкости. При разработке капельной модели ядра большое значение имели закономерности в распространности изотопов в зависимости от четности массового числа, а также постепенное возрастание в периодической системе Менделеева отношения $(A - Z)/Z$ от единицы до 1,6 к концу системы (см. § 16.3). Из этих закономерностей следует, что наибольшая устойчивость должна наблюдаться у таких ядер, которые характеризуются одинаковой «концентрацией» нейтронов и протонов. Возрастание с увеличением A отношения $(A - Z)/Z$ означает рост концентрации нейтронов в «ядерной жидкости». За счет увеличения кулоновской энергии отталкивания протонов, возрастающей пропорционально Z^2 , убывает концентрация протонов и соответственно растет концентрация нейтронов в ядре-капле.

2. Капельная модель ядра позволила установить полуэмпирическую формулу для энергии связи в ядре. Полная энергия ядра должна включать в себя, во-первых,