

осуществляется путём обмена мезонами. Ядерные силы характеризуются радиусом действия; он определяется *комптоновской длиной волны мезонов*,  $k$ -рыми обмениваются нуклоны,  $\lambda_c = \hbar/\mu c$ , где  $\mu$  — масса мезона. Наиб. радиус действия имеют силы притяжения, обусловленные обменом  $\pi$ -мезонами. Для них  $\lambda_c = 1,41$  Фм ( $1 \text{ Фм} = 10^{-13}$  см). Это соответствует расстоянию между нуклонами в ядрах. Обмен более тяжёлыми мезонами ( $\rho$ ,  $\omega$  и др.) оказывает влияние на взаимодействие между нуклонами на меньших расстояниях, вызывая, в частности, отталкивание между ними на расстояниях  $\leq 0,4$  Фм.

Размеры ядер зависят от числа нуклонов в ядре и изменяются в пределах от  $10^{-13}$  до  $10^{-12}$  см. Эксперим. данные показывают, что ср. плотность нуклонов (число нуклонов в единице объёма) почти одинакова во всех ядрах с  $A \geq 20$ . Это означает, что объём ядра пропорционален  $A$ , а его радиус  $R$  пропорционален  $A^{1/3}$ :

$$R = aA^{1/3}, \quad (1)$$

где постоянная  $a$  близка к радиусу действия ядерных сил. Различают зарядовый радиус ядра, т. е. ср. радиус распределения протонов в ядре, и радиус распределения ядерного вещества (радиус распределения нуклонов независимо от их сорта). Первый измеряется в экспериментах с *электромагнитным взаимодействием* (рассеяние электронов высоких энергий на ядрах, исследование уровней *мюонных атомов*), что даёт значение  $a = 1,12$  Фм; второй — в ядерных реакциях с участием адронов (рассеяние нуклонов,  $\alpha$ -частиц, взаимодействие  $\pi$ - и  $K$ -мезонов с ядрами и др.). При этом получают несколько большее значение  $a = 1,2 - 1,4$  Фм. Ср. плотность ядерного вещества очень велика и составляет  $\sim 10^{14}$  г/см<sup>3</sup>.

Эксперименты по рассеянию быстрых электронов на ядрах позволили не только определить ср. размеры ядра, но и детально исследовать распределение заряда  $\rho(r)$  в ядре. Эксперим. результаты лучше согласуются не с однородным распределением заряда в ядре, а с т. н. фермиевским распределением:

$$\rho(r) = \rho_0 / (1 + e^{(r - R_0)/b}), \quad (2)$$

где  $R_0 = 1,1 A^{1/3}$  Фм. Это распределение показывает, что плотность заряда почти постоянна во внутр. области ( $r < R_0$ ) тяжёлого или ср. ядра и экспоненциально спадает за её пределами. Параметр  $b = 0,5$  Фм характеризует «размытость» поверхности ядра; он почти одинаков для всех ядер и означает, что «толщина» ядерной поверхности (интервал, на  $k$ -ром плотность заряда убывает от 90% до 10% значения  $\rho_0 = 0,17$  нуклон/Фм<sup>3</sup>) составляет 2,2 Фм.

Ф-лы (1,2) описывают зависимость радиуса ядра  $R$  и плотности заряда  $\rho(r)$  от  $A$  в среднем и не учитывают индивидуальных особенностей строения ядер. Последние могут привести к нерегулярностям в изменении  $R$ . В частности, из измерений *изотопических сдвигов* энергий атомных уровней следует, что иногда радиус ядра может даже уменьшаться при добавлении двух нейтронов (напр., радиус ядра <sup>48</sup>Ca меньше радиуса <sup>46</sup>Ca). Измерение изотопич. сдвигов уровней атомов и мезоатомов дало возможность оценить изменение радиуса ядра в возбуждённом состоянии. Как правило, по мере возбуждения ядра его радиус увеличивается, но незначительно (доли %). Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что распределения протонов и нейтронов в ядре практически одинаковы. Но в тяжёлых ядрах из-за больших кулоновских сил и связанного с ними избытка нейтронов радиус распределения нейтронов может немного превышать радиус распределения заряда (нейтронное гало). Подобное гало может возникать также в лёгких ядрах, перегруженных нейтронами (<sup>11</sup>Li).

**Энергия связи и масса ядра.** Энергией связи ядра  $\mathcal{E}_{св}$  наз. энергия,  $k$ -рую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отд. нуклоны. Она равна умноженной на  $c^2$  разности суммарной массы всех нуклонов, входящих в состав ядра, и массы  $M$  самого ядра:

$$\mathcal{E}_{св} = c^2 (Zm_p + Nm_n - M). \quad (3)$$

Здесь  $m_p$ ,  $m_n$  — массы протона и нейтрона. Энергия связи ядра примерно пропорц. числу нуклонов в ядре, а уд. энергия связи  $\mathcal{E}_{св}/A$  почти постоянна (для большинства ядер  $\mathcal{E}_{св}/A \sim 6-8$  МэВ). Это свойство, называемое на основании ядерных сил, означает, что нуклон в ядре эффективно взаимодействует не со всеми нуклонами ядра, а только с нек-рым ограниченным их числом (в противном случае уд. энергия связи была бы пропорц.  $A$ ).

Постоянство плотности и уд. энергии связи ядра сближает свойства ядра со свойствами жидкости. Это сходство легло в основу модели ядра как жидкой капли (*капельная модель ядра*), исходя из  $k$ -рой К. Ф. фон Вайцзеккер (С. F. von Weizsäcker) в 1935 предложил полумпирич. ф-лу (*Вайцзеккера формула*) для энергии связи ядра:

$$\mathcal{E}_{св} = b_1 A - b_2 A^{2/3} - b_3 Z^2 A^{-1/3} - b_4 \frac{(N-Z)^2}{A} + \delta(A, Z) A^{-3/4}. \quad (4)$$

Здесь первый член описывает объёмную энергию «капли», второй — характеризует ослабление связи для нуклонов, находящихся на поверхности ядра, третий член описывает вклад кулоновской энергии капли радиусом  $R \sim A^{1/3}$  и с зарядом  $Z$ . Четвёртый член (т. н. энергия симметрии) не имеет классич. аналога и отражает тот факт, что притяжение между нуклонами разного сорта в ср. сильнее, чем для одинаковых нуклонов. Это вместе с *Паули принципом* делает энергетически невыгодным значит. отклонение  $N$  от  $Z$ . Пятый член наз. энергией спаривания:

$$\delta = \begin{cases} 33,57 \text{ МэВ,} & \text{для чётных } N \text{ и } Z; \\ 0, & \text{для нечётных } N; \\ -33,57 \text{ МэВ,} & \text{для нечётных } N \text{ и } Z. \end{cases}$$

Он воспроизводит опытный факт, что чётно-чётные ядра ( $Z$  и  $N$  чётные) связаны сильнее, чем соседние чётно-нечётные, а последние, в свою очередь, более устойчивы, чем нечётно-нечётные ядра.

Совр. значения параметров ф-лы Вайцзеккера:  $b_1 = 15,75$  МэВ,  $b_2 = 17,8$  МэВ,  $b_3 = 0,71$  МэВ,  $b_4 = 23,7$  МэВ. Ф-ла (4) в ср. хорошо описывает энергии связи ядер, ограничивает значением  $Z^2/A \sim 46$  область существования ядер, устойчивых по отношению к делению. Однако она не учитывает индивидуальных особенностей оболочечной структуры ядра. Эти эффекты можно учесть методом оболочечной поправки Струтинского, предсказывающим возможность существования т. н. островов стабильности сверхтяжёлых ядер при  $Z \sim 114$  (см. *Трансурановые элементы*).

**Квантовые характеристики ядерных уровней.** Я. а. при энергиях ниже порога распада (с испусканием нуклона,  $\alpha$ -частицы и т. п.) может находиться только в дискретных состояниях с определ. энергией, характеризующихся набором квантовых чисел, задающих значения сохраняющихся величин (интегралов движения) в этих состояниях. Выше порога распада ядра дискретные состояния становятся нестационарными и проявляются в ядерных реакциях как резонансы конечной ширины.

Наиб. важными характеристиками ядерных состояний являются спин ядра (или момент кол-ва движения, называемый также угловым моментом ядра)  $I$  и чётность  $\pi = \pm 1$ . Спин  $I$  измеряется в единицах  $\hbar$  и принимает положительные значения ( $I = 1/2, 3/2, \dots$ ) у нечётных ядер и целочисленные значения ( $I = 0, 1, 2, \dots$ ) у чётных ядер. Чётность  $\pi$  указывает на симметрию волновой ф-ции  $\psi$  ядерного состояния относительно зеркального отражения пространства  $P$  (см. *Пространственная инверсия*):  $P\psi = \pi\psi$ . В связи с этим для ядерных состояний указывают объединённую характеристику  $I^\pi$ . Эмпирически установлено, что осн. состояния чётно-чётных ядер имеют характеристику  $0^+$ . Спины и чётности нечётных ядер, как правило, объясняются моделью оболочек (см. ниже). Строго говоря, чётность не является точным квантовым числом, поскольку она не сохраняется при *слабом взаимодействии*. За счёт сил *электрослабого взаимодействия* между нуклонами происходит смешивание состояний с одним и тем же спином  $I$  и противоположными чётностями. Однако вследствие малости сил, нарушающих чётность, указанное смешивание мало