

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 μ — масса мезона. Наиб. радиус действия имеют силы притяжения, обусловленные обменом π -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 (ρ , ω 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, α -частиц, взаимодействие π - 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/см³.

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/Фм³) 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 ⁴⁸Ca меньше радиуса ⁴⁶Ca). 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 (¹¹Li).

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, α -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 π указывает на симметрию волновой ф-ции ψ 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^π . 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