

Мгновенные γ -лучи деления. Кроме γ -лучей, которые сопровождают β^- -распад осколков и испускаются в течение длительного времени, обнаружены мгновенные γ -лучи. Они испускаются возбужденными осколками в процессе их перехода в основное состояние после испускания мгновенных нейтронов деления. Энергетический спектр таких γ -лучей непрерывный, максимальная энергия близка к 7 Мэв.

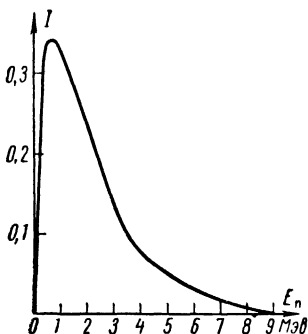


Рис. 84. Энергетический спектр нейтронов полученных при делении урана-235

Распределение энергии деления. Непосредственное измерение энергии осколков и энергии, уносимой другими продуктами деления, дало следующее приближенное распределение энергии (в Мэв):

Кинетическая энергия осколков деления	168
Энергия нейтронов деления	5
Энергия β^- -частиц продуктов деления	7
Энергия мгновенного γ -излучения	5
Энергия γ -излучения продуктов деления	6
Энергия антинейтрино продуктов деления	10
Общая энергия	201

§ 39. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ДЕЛЕНИЯ

Механизм деления можно с хорошей степенью приближения объяснить при помощи капельной модели ядра. Можно считать, что ядерные силы стремятся сохранить стабильность ядра точно так же, как силы поверхностного натяжения стремятся удержать каплю жидкости в устойчивом состоянии. Ядро-мишень соединяет-

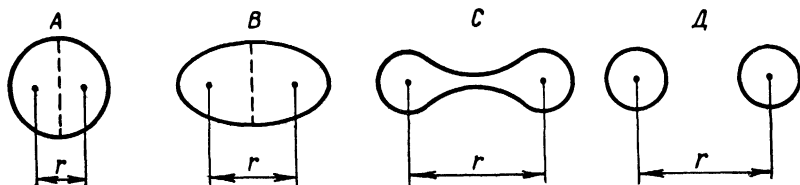


Рис. 85. Капельная модель деления ядра

ся с нейтроном, образуя составное ядро, энергия возбуждения которого определяется суммой кинетической энергии и высвобождающейся энергии связи нейтронов.

Благодаря наличию избыточной энергии составное ядро будет испытывать сильные колебания. Сначала ядро-капля имеет сфери-

ческую форму A рис. 85. В процессе колебаний оно может пройти через фазу B . Если энергия возбуждения недостаточна, чтобы преодолеть силу поверхностного натяжения, то капля вернется к своей первоначальной сферической форме. Однако если ядро получит энергию, достаточную для того, чтобы оно могло принять форму гантели C , то возвращение к первоначальному состоянию станет маловероятным.

Исходя из таких представлений, можно получить некоторые количественные характеристики, если использовать приведенную в гл. 1 полуэмпирическую формулу Вайцзеккера, согласно которой полная энергия ядра равна:

$$E_{\text{ядра}} = (Zm_p + Nm_n)c^2 - \alpha A + \beta A^{2/3} + \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} + \dots$$

Очевидно, что при изменении формы ядра меняются только два члена: член, определяющий энергию поверхностного натяжения $E_{\sigma} = \beta A^{2/3} = 4\pi R^2 \sigma$, и член, определяющий энергию кулоновского расталкивания протонов $E_p = \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} = \frac{3}{5} \cdot \frac{(Ze)^2}{R}$. Сила поверхностного натяжения стремится вернуть ядро к сферической форме; сила кулоновского отталкивания стремится увеличить расстояние между протонами, т. е. увеличить деформацию ядра. Таким образом, мерой энергии ядра в процессе деления является сумма поверхностной и кулоновской энергии

$$E_{\sigma} + E_p.$$

Поскольку при заданном объеме наименьшую поверхность имеет шар, переход ядра из состояния A в B сопровождается увеличением поверхностной энергии E_{σ} и уменьшением энергии кулоновского взаимодействия E_p вследствие увеличения среднего расстояния между протонами. Если сообщенная ядру энергия недостаточна для разрушения ядра, то через некоторое время произойдет сжатие ядра, сопровождающееся уменьшением E_{σ} и увеличением E_p , — ядро будет испытывать колебания. При достаточно большой энергии возбуждения центры «осколков» расходятся настолько далеко, что действие кулоновских сил расталкивания не может быть скомпенсировано противодействием сил поверхностного натяжения и ядро перейдет в состояние C (рис. 85) «гантель». Далее поверхностные силы уже способствуют разделению, «помогая» обоим половинкам гантели раздельно принять сферическую форму.

Мерой способности ядер к делению может служить отношение энергии кулоновского отталкивания протонов, стремящегося разорвать каплю, и энергии поверхностного натяжения, противодействующего «растеканию» ядерной капли

$$\frac{E_p}{E_{\sigma}} = \frac{3}{5} \cdot \frac{(Ze)^2}{R} \cdot \frac{1}{4\pi R^2 \sigma} = \frac{3e^2}{20\pi\sigma r_0^3} \cdot \frac{Z^2}{A}.$$

Единственной переменной величиной для разных ядер в этом отношении является так называемый *параметр деления* Z^2/A . Чем он больше, тем легче делится данное ядро.

Построив зависимость потенциальной энергии ядерной капли U от среднего расстояния между осколками \bar{r} , мы получим ха-

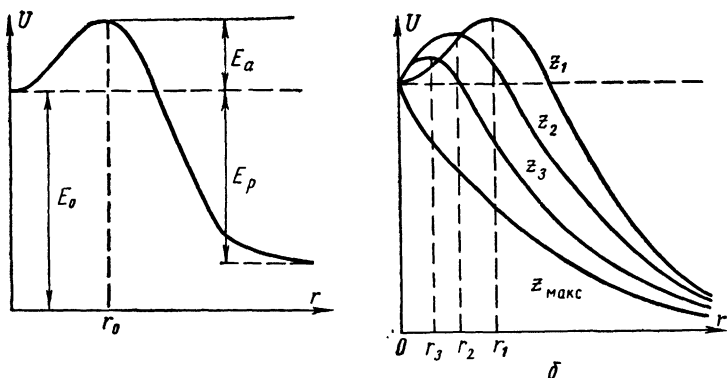


Рис. 86. Зависимость потенциальной энергии ядра от среднего расстояния между осколками: а — при $Z = \text{const}$; б — при увеличении Z

актерную кривую с ярко выраженным максимумом (рис. 86), напоминающую кривую потенциальной энергии при α -распаде. Остановимся на физической стороне этой зависимости. Как уже было сказано, изменение потенциальной энергии при деформации ядра происходит лишь за счет изменения суммы энергий электростатического отталкивания и поверхностного натяжения $E_p + E_\sigma$. Рассмотрим процесс, обратный делению, который происходил бы при сближении осколков. Пока они еще не касаются друг друга, E_σ осколков не изменяется и потенциальная энергия возрастает за счет кулоновского отталкивания по закону $\left(\frac{Z}{2}\right)^2 \frac{e^2}{r}$ вблизи $r = r_0$ (расстояние между центрами обоих осколков половинного объема в момент их касания) начинают сказываться ядерные силы притяжения и потенциал перестает изменяться по закону Кулона. При дальнейшем уменьшении r уменьшается энергия поверхностного натяжения и ядро стремится принять сферическую форму. Часть кривой от r_c до 0 соответствует постепенной деформации вытянутого эллипсоида с малым эксцентриситетом в сферу. Расчеты показывают, что E_σ при этом уменьшается сильнее, чем растет E_p . На рис. 86, а за нуль r условно принято расстояние между осколками при сферической форме ядра. Энергия ядра обозначена E_0 . Вершина барьера соответствует критической деформации ядра, после которой происходит деление.

Наличие потенциального барьера делает процесс деления с точки зрения классической физики энергетически невозможным, с точки же зрения квантовой механики только маловероятным. Для того чтобы ядро разделилось сразу, в него должна быть внесена энергия возбуждения, превосходящая некоторое критическое значение E_a , называемое *энергией активации*. Эта энергия определяется разностью между потенциальной энергией в максимуме барьера и E_0 . При делении выделится энергия реакции E_p , определяемая разностью масс исходного ядра и осколков.

Согласно квантовой механике должна существовать также конечная вероятность просачивания осколков сквозь потенциальный барьер без получения ядром дополнительной энергии активации. При этом квантовая проникаемость барьера мала из-за большой массы осколков. Это явление называется *спонтанным делением*.

Мы видели, что для данного изотопа энергия активации зависит от величины отношения Z^2/A . Расчеты показывают, что при $Z^2/A \approx 45$ ядра оказываются неустойчивыми относительно самопроизвольного деления.

Если построить зависимость отношения Z^2/A от Z (рис. 87) и экстраполировать получившуюся прямую до значения $Z^2/A = 45$, можно найти максимально возможное значение Z оно оказывается близко к 110. Согласно капельной модели это число определяет принципиальную границу таблицы

Менделеева. Однако накопленные экспериментальные данные привели к выводу, что многие факты не могут быть поняты в рамках этой модели. Опыт показал, например, что способность ядер к спонтанному делению зависит от параметра Z^2/A отнюдь не монотонно, ядра с четным числом протонов и четным числом нейтронов делятся легче, чем ядра с нечетным числом нуклонов. В 1961 г. в ОИЯИ (Дубна) был открыт новый тип деления — деление ядер в изомерном состоянии, протекающее за время в 10^{23} раз большее времени распада этого изомера в основном состоянии.

Все эти и другие факты потребовали для своего объяснения учета существования в ядрах оболочек, заполненных нуклонами.

В последнее время интенсивно развиваются идеи о новой области стабильности ядер, расположенной около дважды магического ядра с атомным номером $Z=126$ и числом нуклонов $A=310$. Расчеты показали также, что возможно дважды магическим изотопом окажется уже ядро с $Z=114$ и $A=298$.

Надо думать, что уже через несколько лет ученые, работающие над проблемой синтеза новых элементов, займутся поисками этих новых областей стабильности ядер.

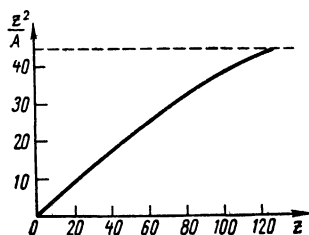


Рис. 87. Зависимость отношения $\frac{Z^2}{A}$ от Z