

ние трансурановых элементов, а, наоборот, деление урана на два легких осколка.

Многочисленные исследователи в различных лабораториях мира начали проверять это предположение. В течение трех месяцев после первого сообщения о делении ядер было выполнено огромное количество работ, подтвердивших гипотезу Фриша и Мейтнер.

В частности, были проведены следующие опыты:

А. На стенки ионизационной камеры наносилось вещество, содержащее уран. В цепь включался усилитель и осциллограф. При этом наблюдались импульсы от α -частиц радиоактивного урана. Когда вблизи помещался источник нейтронов, на осциллографической записи появлялись большие пики, характерные для энергий ≈ 100 Мэв.

Б. Внутри камеры Вильсона ставили пластинки со слоем окиси урана и наблюдали короткие треки от α -частиц. При внесении нейтронного источника появлялись толстые треки, не отклоняющиеся в не очень сильных магнитных полях, что возможно, если ионизирующие частицы являются тяжелыми. Было замечено, что эти частицы можно осаждать на другую пластинку, помещенную вблизи от слоя урана. Полученные таким образом осколки деления обладали радиоактивными свойствами, которые ранее приписывались трансурановым элементам. Этими осколками оказались сильно ионизованные атомы брома, криптона, лантана, бария и других элементов со средними атомными номерами.

В 1940 г. советскими учеными Флеровым и Петржаком было обнаружено спонтанное деление изотопа урана с периодом полураспада 10^{16} лет. В одном грамме урана за час делится самопроизвольно в среднем всего около 25 ядер.

§ 38. ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ДЕЛЕНИИ ЯДЕР УРАНА

Освобождение энергии при делении ядер. Так же как и в других ядерных реакциях, энергия, освобождающаяся при делении, эквивалентна разности масс взаимодействующих частиц и конечных продуктов. Так как энергия связи нуклона в уране $\approx 7,6$ Мэв, а энергия связи одного нуклона в осколках $\approx 8,5$ Мэв при делении урана должна выделяться энергия

$$Q = A(8,5 - 7,6) = 0,9 \cdot 236 \approx 210 \text{ (Мэв)}.$$

Таким образом, при делении ядра освобождается огромная энергия, подавляющая ее часть выделяется в виде кинетической энергии осколков деления.

Распределение продуктов деления по массам. Ядро урана в большинстве случаев делится несимметрично. Два ядерных осколка имеют соответственно разные скорости и разные массы.

Осколки по массам распадаются на две группы; одна вблизи криптона с $A_1=90$, другая вблизи ксенона $A_2=140$ (рис. 82). Массы осколков относятся друг к другу в среднем как $A_2/A_1=1,45$. Из законов сохранения энергии и импульса можно получить, что кинетические энергии осколков должны быть обратно пропорциональны их массам:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{A_2}{A_1} = 1,45.$$

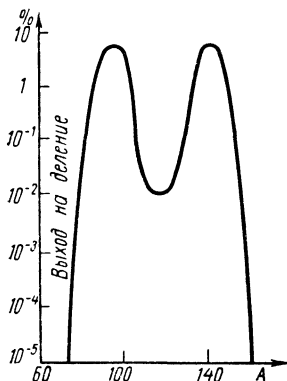


Рис. 82. Распределение продуктов деления урана по массам

Кривая выхода продуктов деления симметрична относительно вертикальной прямой, проходящей через точку $A=117$. Значительная ширина максимумов свидетельствует о многообразии путей деления.

Перечисленные характеристики относятся главным образом к делению под действием тепловых нейтронов; в случае деления под действием нейтронов с энергией в несколько Мэв и больше, ядро распадается на два более симметричных по массам осколка.

Свойства продуктов деления. При делении атома урана происходит срыв очень многих электронов оболочек, и осколки деления представляют собой приблизительно 20-кратно ионизованные положительные ионы, которые при прохождении через вещество сильно ионизуют атомы. Поэтому пробеги осколков в воздухе небольшие и близки к 2 см.

Легко установить, что образующиеся при делении осколки должны быть радиоактивными, склонными к испусканию нейтронов. Действительно, у стабильных ядер отношение числа нейтронов и протонов меняется в зависимости от A следующим образом:

Изотоп	O_8^{16}	Ag_{47}^{108}	U_{92}^{238}
Величина N/Z	1	1,3	1,6

Ядра, которые образовались при делении, лежат в середине таблицы и, следовательно, содержат больше нейтронов, чем это допустимо для их стабильности. Освобождаться от лишних нейтронов они могут как путем β^- -распада, так и непосредственно испуская нейтроны.

Запаздывающие нейтроны. В одном из возможных вариантов деления образуется радиоактивный бром. На рис. 83 показана схема его распада, в конце которой находятся стабильные изотопы Sr_{38}^{87} и Kr_{36}^{86} .

Интересна особенность этой цепочки: криптон может освобождаться от лишнего нейтрона либо за счет β^- -распада, либо если он образовался в возбужденном состоянии (Kr^{87*}) за счет прямого испускания нейтрона. Эти нейтроны появляются через 56 сек после деления (время жизни Br относительно β^- -перехода в возбужден-

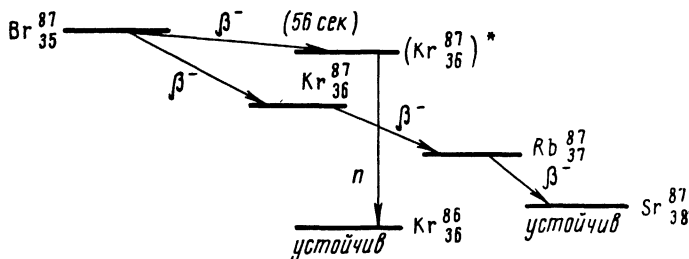


Рис. 83. Схема распада радиоактивного брома, образованного в возбужденном состоянии при делении урана

ное состояние Kr^*), хотя сам Kr^* испускает нейтроны практически мгновенно. Они называются *запаздывающими нейтронами*. Со временем интенсивность запаздывающих нейтронов спадает по экспоненте, как при обычном радиоактивном распаде.

Энергия этих нейтронов равна энергии возбуждения ядра. Хотя они составляют лишь 0,75% от всех нейтронов, вылетающих при делении, в осуществлении цепной реакции запаздывающие нейтроны играют важную роль.

Мгновенные нейтроны. Свыше 99% нейтронов освобождается в течение чрезвычайно короткого времени; их называют *мгновенными нейтронами*.

При изучении процесса деления возникает фундаментальный вопрос, сколько нейтронов получается в одном акте деления; этот вопрос важен потому, что если их число в среднем велико они могут быть использованы для деления последующих ядер, т. е. возникает возможность создания цепной реакции. Над разрешением этого вопроса в 1939—1940 гг. работали практически во всех крупнейших ядерных лабораториях мира.

Экспериментально было получено, что в среднем на один акт деления испускается приблизительно 2,5 нейтрона.

Было выяснено, что нейтроны испускаются непосредственно осколками деления, а не составным ядром урана, образовавшимся в результате проникновения в него нейтрона. Энергия мгновенных нейтронов в среднем близка к 1—2 Мэв.

Энергетический спектр нейтронов деления U^{235} приведен на рис. 84.

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.

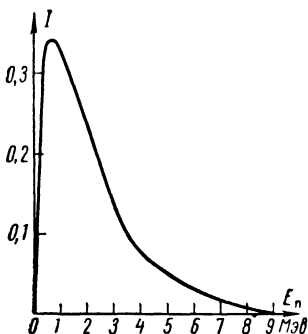


Рис. 84. Энергетический спектр нейтронов полученных при делении урана-235

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-

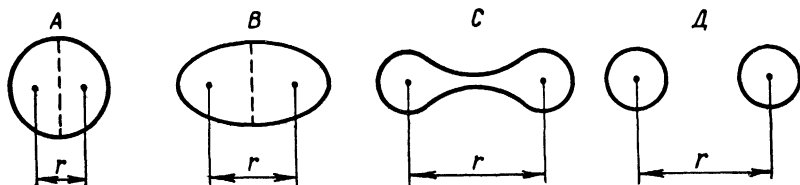


Рис. 85. Капельная модель деления ядра

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-