

## 2.4 Спонтанное деление

Четвертый вид радиоактивности, открытый в 1940 Г.Н.Флеровым и К.А.Петржаком, связан со спонтанным делением ядер, в процессе которого некоторые достаточно тяжелые ядра распадаются на два осколка с примерно равными массами. Спонтанное (самопроизвольное) деление впервые было обнаружено для природного урана. Ядра урана могут делиться различным образом, давая два осколка (например,  ${}_{56}\text{Ba}-{}_{36}\text{Kr}$ ,  ${}_{54}\text{Xe}-{}_{38}\text{Sr}$  и т.п.). В 1 г естественного урана происходит в среднем одно деление в минуту.

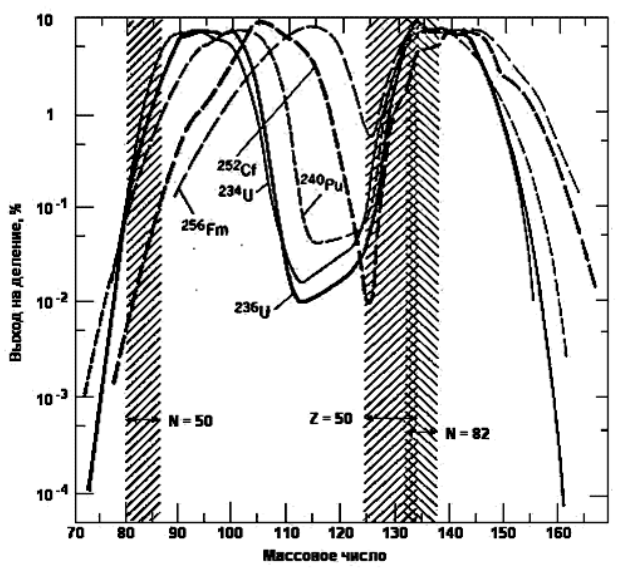
**Спонтанное деление** – самопроизвольный распад тяжёлых ядер на два (редко – три или четыре) осколка – ядра элементов середины Периодической таблицы.

**Рис.21.** Сводка данных о периодах полураспада тяжёлых ядер относительно спонтанного деления

Спонтанное деление становится энергетически выгодным, начиная уже примерно с  $Z=50$ . Однако благодаря электростатическому отталкиванию между осколками деления возникает потенциальный барьер (подобно тому, как это имеет место для  $\alpha$ -распада), который не позволяет

ядру мгновенно разделиться и обуславливает существование спонтанного деления, как особого вида радиоактивности, наблюдаемого лишь для самых тяжёлых элементов ( $Z \geq 90$ ). Делению способствует кулоновское отталкивание между протонами, энергия которого ( $U_{\text{кул}}$ ) в сферическом зерне с радиусом  $r$  пропорциональна  $Z^2/r$ ; делению препятствует стремящееся сохранить сферическую форму ядра поверхностное натяжение: его энергия  $U_{\text{п.н.}}$  пропорциональна поверхности ядра, т.е.  $r^2$ . В результате способность ядер к делению возрастает с увеличением отношения  $U_{\text{кул}}/U_{\text{п.н.}}$ , пропорционального  $Z^2/r^3$ , а тем самым и параметру деления  $Z^2/A$ , поскольку объём ядра  $(4/3)\pi r^3$  пропорционален числу

содержащихся в ядре нуклонов, т.е. массовому числу ядра  $A$ . Энергетической выгодности спонтанного деления отвечает условие  $Z^2/A \geq 16$ , мгновенному делению  $Z^2/A \geq 47$ .



**Рис.22.** Массовые распределения осколков деления тепловыми нейтронами  ${}^{233}\text{U}$ ,  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$  и спонтанного деления  ${}^{252}\text{Cf}$ ,  ${}^{256}\text{Fm}$ . Заштрихованные области указывают приблизительное расположение ядер с замкнутыми оболочками

Сводка данных о периодах полураспада ядер по механизму спонтанного деления приведена на **Рис.22**. В большинстве случаев делящиеся ядра являются, в основном,  $\alpha$ - или  $\beta$ - активными, а спонтанное деление оказывается маловероятным каналом распада. Известен, однако, и ряд изотопов, для которых спонтанное деление – это главный, а иногда и

единственный из наблюдавшихся до сих пор канал распада: таковы, например,  ${}^{256}\text{Fm}$  ( $T=160$  мин) и  ${}^{254}\text{Cf}$  ( $T=60,5$  суток). Спонтанное деление и вслед за ним -  $\alpha$ -распад есть основные виды радиоактивности, ограничивающие перспективы получения новых трансурановых элементов.

Разнообразие вариантов осколочных пар не позволяет дать определённые однозначные правила смещения по периодической системе при спонтанном делении; с наибольшей вероятностью реализуется несимметричное деление на тяжёлый и лёгкий осколки, заряды и массы которых составляют примерно 60% и 40% от заряда и массы делящегося ядра. Поскольку отношение  $N/Z$  для изотопов тяжёлых элементов выше, чем для устойчивых изотопов середины Периодической системы, спонтанное деление сопровождается испусканием нейтронного (в среднем от 2 до 4 для разных ядер), а, кроме того, осколки деления оказываются перегруженными нейтронами и испытывают последовательный ряд  $\beta$ -распадов.

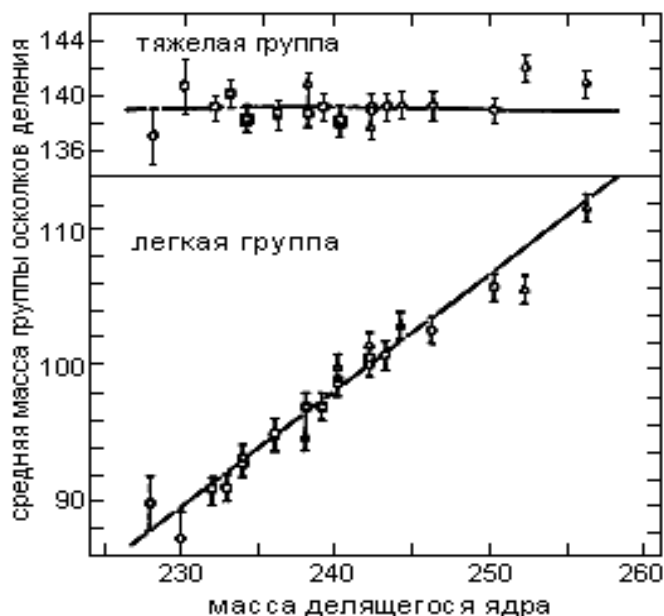
Кинетическая энергия осколков деления сравнительно мало зависит от энергии возбуждения делящегося ядра, так как излишняя энергия обычно, идет на возбуждение внутреннего состояния осколков. На **Рис.22** показаны массовые распределения осколков деления  ${}^{234}\text{U}$  и более тяжёлых ядер.

Видно, что массовые распределения тяжелых осколков близки, в то время как средняя масса легких осколков меняется от  $\sim 90$  у  $^{234}\text{U}$  до  $\sim 114$  у  $^{256}\text{Fm}$ . Это особенно хорошо видно на **Рис.23**.

Средняя масса легкой группы практически линейно растет с ростом массы делящегося ядра, в то время как средняя масса тяжелой группы остается практически неизменной ( $A \approx 140$ ). Таким образом, практически все добавочные нуклоны идут в легкие осколки. На **Рис.** заштрихованы области ядер с магическими числами протонов и нейтронов. Для  $Z=50$  стабильным ядрам соответствует  $Z/A \approx 0.4$  ( $A=125$ ). Нейтроноизбыточные осколки деления имеют  $Z/A$  до  $\sim 0.38$  ( $A=132$ ), т.е. около 7 «лишних» нейтрона. Как раз на краю тяжелой группы осколков находится дважды магическое ядро  $^{132}\text{Sn}$  ( $Z=50$ ,  $N=82$ ). Это исключительно стабильная конфигурация определяет нижний край массового распределения тяжелых осколков. Для легких осколков этого эффекта нет. Массовое распределение легких осколков практически не попадает в область даже одного магического числа  $N=50$  и существенно меньше определяется оболочечными эффектами. Оно формируется из нуклонов «оставшихся» после формирования тяжелого осколка.

По своим основным характеристикам: величине выделяемой энергии (200 МэВ), виду спектра масс осколков, числу и энергии вторичных нейтронов (мгновенных – испускаемых в момент деления и запаздывающих – вылетающих после  $\beta^-$ -распада осколков) – спонтанное деление очень схоже с делением тяжёлых ядер под действием нейтронов.

По своим основным характеристикам: величине выделяемой энергии (200 МэВ), виду спектра масс осколков, числу и энергии вторичных нейтронов (мгновенных – испускаемых в момент деления и запаздывающих – вылетающих после  $\beta^-$ -распада осколков) – спонтанное деление очень схоже с делением тяжёлых ядер под действием нейтронов.



**Рис.23.** Зависимость средних масс легкой и тяжелой групп осколков от массы делящегося ядра