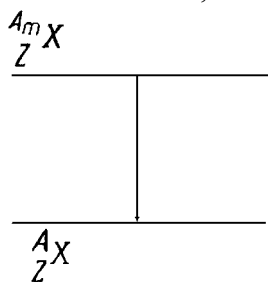


2.3 Изомерный переход

Гамма-излучение иногда также рассматривается как особый вид радиоактивности, хотя оно и не приводит к изменению состава ядра – ядро лишь переходит при этом с одного энергетического уровня на другой.

Существуют ядра, которые состоят из одинакового числа протонов и одинакового числа нейтронов, но тем не менее различаются своими радиоактивными свойствами (прежде всего периодом полураспада); такие ядра называются изомерными. Изомерные ядра находятся на различных энергетических уровнях. Ядро-изомер, которое находится на более высоком энергетическом уровне, принято называть возбужденным, или метастабильным, и обозначать звездочкой или индексом *m* возле массового числа, например: $^{80*}\text{Br}$ или ^{80m}Br .



Переход ядра из метастабильного в основное (невозбужденное) состояние называют изомерным переходом (И. П.).

Рис.20. Схематическое изображение изомерного перехода

Изомерный переход сопровождается γ -излучением. γ -Лучи представляют собой коротковолновое (с длиной волны 10^{-9} - 10^{-12} см) электромагнитное излучение. Атомный номер и массовое число при изомерном переходе не изменяются:

$$\text{И.П.} \begin{cases} Z \rightarrow Z \\ A \rightarrow A \end{cases}$$

например,

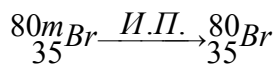
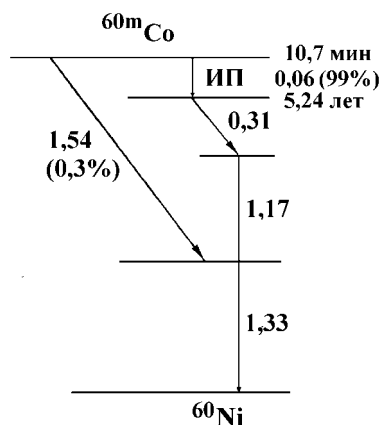


Рис.21. Схема распада ^{60m}Co .

Испускание γ -квантов на схемах распада изображается вертикальной стрелкой (**Рис.20 и 21**).

Явление ядерной изомерии особенно распространено в области значений *Z* и *N*, приближающихся к «магическим», отвечающим целиком заполненным протонным или нейтронным оболочкам: 50, 82 и 126. Примеры изомеров $^{93m}_{41}\text{Nb}$ (*T*=12 лет), $^{135m}_{56}\text{Ba}$ (*T*=28,7 час), $^{199}_{80}\text{Hg}$ (42 мин).

γ -Излучение характеризует особый тип распада лишь при изомерном переходе. Очень часто другие типы распада также сопровождаются γ -излучением. В результате любого радиоактивного процесса дочернее ядро может оказаться в возбужденном состоянии. Однако, если энергия возбуждения излучается путем испускания γ -квантов практически одновременно с актом распада, который привел к возбужденному состоянию ядра, то не имеет смысла говорить о самостоятельном типе распада.

Для многих ядерных изомеров наблюдается так называемая внутренняя электронная конверсия: возбужденное ядро, не излучая γ -квантов, передает свою избыточную энергию электронным оболочкам, вследствие чего один из электронов вылетает из атома. После внутренней конверсии возникает вторичное излучение в рентгеновской и оптической областях вследствие заполнения одним из электронов освободившегося места и последующих переходов. Участие электронных оболочек в конверсионных переходах приводит к тому, что время жизни соответствующих изомеров зависит (хотя и очень слабо) от химического состояния превращающихся атомов.

Внутренняя конверсия может быть легко обнаружена, так как конверсионные электроны (e^-) имеют линейчатый спектр в отличие от непрерывного спектра ядерных β^- -частиц. Внутренняя конверсия всегда сопровождается характеристическим рентгеновским излучением.

Замечание. Известны и такие ядерные изомеры, для которых преобладает не γ -излучение, но распад по какому-либо из основных типов распада. Так, изомер $^{176m}_{71}\text{Lu}$ (*T*=3,7 часа) испытывает, как и основной изотоп ^{176}Lu , β^- -распад; изомер $^{212m}_{84}\text{Po}$ (*T*=45 сек), как и основной изотоп ^{212}Po , α -распад; изомер $^{242m}_{95}\text{Am}$ (*T*=14 мсек) – спонтанное деление.

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.22. 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 α -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 $Z^2/A \geq 47$.

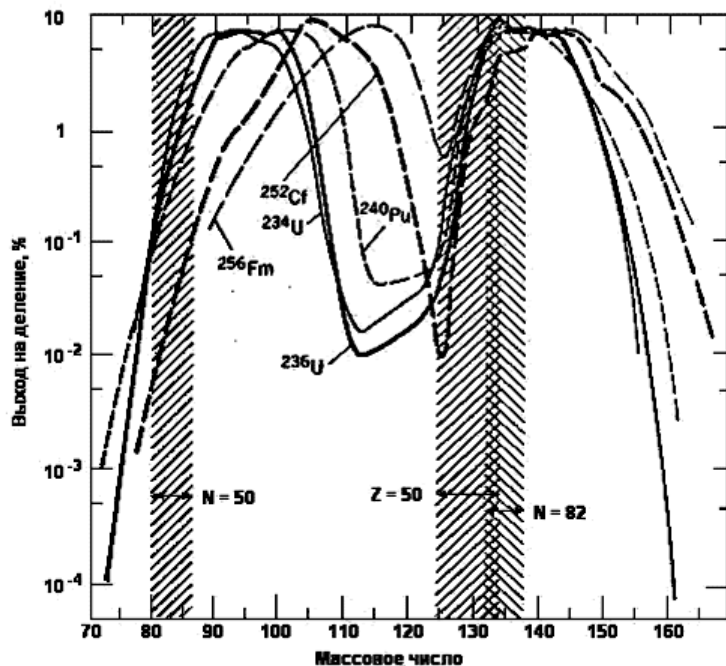


Рис.23. Массовые распределения осколков деления тепловыми нейтронами ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu и спонтанного деления ^{252}Cf , ^{256}Fm . Заштрихованные области указывают приблизительное расположение ядер с замкнутыми оболочками

Сводка данных о периодах полураспада ядер по механизму спонтанно деления приведена на **Рис.22**. В большинстве случаев делящиеся ядра являются, в основном, α - или β - 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}Fm ($T=160$ мин) и ^{254}Cf ($T=60,5$ суток). Спонтанное деление и вслед за ним - α -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 β^- -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.23** показаны массовые распределения осколков деления ^{234}U и более тяжелых ядер. Видно, что

массовые распределения тяжелых осколков близки, в то время как средняя масса легких осколков меняется от ~ 90 у ^{234}U до ~ 114 у ^{256}Fm (**Рис.24**).

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.23** 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 ~ 0.38 ($A=132$), т.е. около 7 «лишних» нейтрона. Как раз на краю тяжелой группы осколков находится дважды магическое ядро ^{132}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 β -распада осколков) – спонтанное деление очень схоже с делением тяжёлых ядер под действием нейтронов.

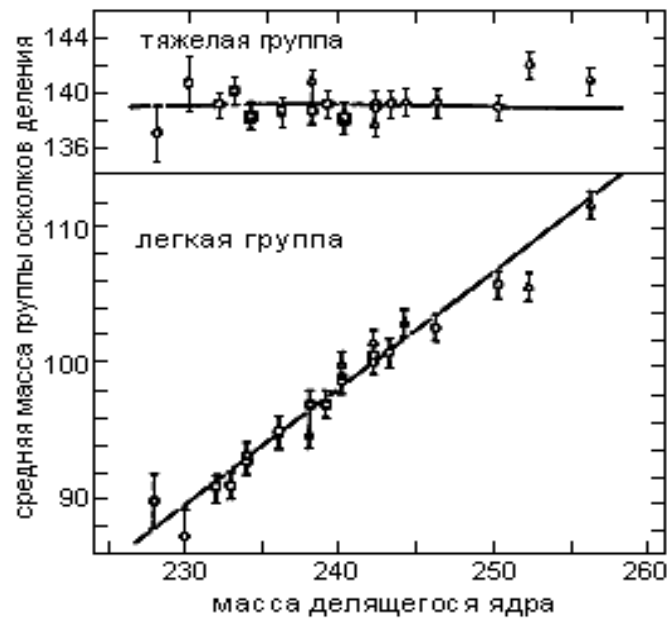


Рис.24. Зависимость средних масс легкой и тяжелой групп осколков от массы делящегося ядра