**Деление атомных ядер
Nuclear fission**

|  |
| --- |
| http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/images/im023_1.jpgРис. 1. Процесс вынужденного деления ядра |

    **Деление атомных ядер** – их распад на две части (осколка) сравнимой массы. Деление может быть самопроизвольным (спонтанным) или вынужденным, вызванным взаимодействием ядра с внешней частицей. Деление энергетически выгодно, т.е. сопровождается освобождением энергии, для тяжёлых ядер и является основным источником ядерной энергии. При этом энерговыделение составляет величину 1 МэВ на один нуклон делящегося вещества или 1014Дж/кг, что намного порядков превосходит энерговыделение всех других освоенных человеком источников энергии. Энергия деления используется в атомных электростанциях (ядерные реакторы) и атомном оружии.
    Процесс деления можно проиллюстрировать, рассматривая ядро как каплю заряженной ядерной жидкости (рис. 1). В процессе деления ядро последовательно проходит через следующие стадии: шар (*а*), деформация (*б*), гантель (*в*), образование "шейки" (*г*), два осколка (*д*). В стадии (*б*) силы поверхностного натяжения, направленные внутрь ядра, стремятся уменьшить площадь поверхности ядра и вернуть его в исходное сферическое состояние, тем самым, препятствуя дальнейшему развитию процесса деления. Для того чтобы ядро “проскочило” стадию (*б*) и оказалось в стадии (*в*), когда деление становится необратимым, ему нужно сообщить энергию извне. Эта энергия может быть передана ядру любой внешней частицей, но практически наиболее выгодно использовать для этой цели лишённые электрического заряда нейтроны, так как их сближению с ядром не препятствуют кулоновские силы отталкивания.
    Ядро может разделиться на два осколка с близкими (и даже равными) массами. Но это происходит редко. Чаще один из осколков тяжелее другого (примерно в 1.5 раза). Одна из наиболее типичных реакций деления ядра урана-235 выглядит так:



Она протекает за время не более, чем 10-12сек и сопровождается испусканием трёх нейтронов. Увеличение числа нейтронов в процессе деления открывает возможность протекания цепной ядерной реакции деления.

|  |
| --- |
| http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/images/im023_2.gifРис. 2. Зависимость удельной энергии связи ядра epsilon от массового числа А. |

    То, что в реакции деления должна освобождаться энергия, следует из зависимости удельной энергии связи ядра  (средней энергии связи нуклона в ядре) от массового числа А (рис. 2). Так в делящемся ядре урана (А = 236) средняя энергия связи нуклона 7.6 МэВ, а у ядер-осколков эта энергия примерно 8.5 МэВ. Избыток энергии связи освобождается. Для одного нуклона этот избыток равен (8.5 - 7.6) МэВ = 0.9 МэВ.Учитывая, что число нуклонов в ядре урана равно 236, получаем для энергии, выделяющейся в одном акте деления, величину 0.9 МэВ . 236  212 МэВ. Эта энергия выделяется в основном в виде кинетической энергии разлетающихся осколков.

    Энергия деления распределяется примерно следующим образом.

|  |  |
| --- | --- |
| Кинетическая энергия осколков | 167 МэВ |
| Энергия нейтронов деления | 5 МэВ |
| Энергия мгновенных гамма-квантов | 7 МэВ |
| Энергия бета-частиц продуктов деления | 8 МэВ |
| Энергия гамма-излучения продуктов деления | 7 МэВ |
| Энергия антинейтрино продуктов деления | 10 МэВ |
| Всего | 200 МэВ |

    Деление было открыто [Отто Ганом](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/hahn.htm), [Фрицем Штрассманом](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/strassmann_fritz.htm) и [Лизой Мейтнер](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/meitner.htm) в
1938 г. Правильная интерпретация необычного ядерного процесса была дана в том же году Мейтнер и [Отто Фришем](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/frisch_otto.htm).

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Деление атомных ядер**    Делением атомных ядер называют их распад на 2–3 осколка сравнимой массы. Деление может быть самопроизвольным (спонтанным) или вынужденным (вызванным взаимодействием с налетающей частицей). Деление энергетически выгодно для тяжёлых ядер и является основным источником ядерной энергии.    Пользуясь формулой Вайцзеккера для энергии связи ΔW(A,Z) ядра (A,Z)

|  |  |
| --- | --- |
| ΔW = a1A - a2A2/3 - a3Z2/A1/3 - a4(A/2 - Z)2/A + a5A-3/4, | (7.1) |

где a1 = 15.75 МэВ; a2 = 17.8 МэВ; a3 = 0.71 МэВ; a4 = 23.6 МэВ; http://nuclphys.sinp.msu.ru/spargalka/images/s003_3.gifможно оценить энергию, которая освобождается в одном акте деления. Если ядро с массовым числом A = 220 делится на два равных осколка с A2 = 110, удельная энергия связи осколков по сравнению с удельной энергией связи начального ядра увеличивается на Δε ≈ 0.8 МэВ ( от ε1 ≈ 7.6 МэВ для ядра с А = 220 до ε2 ≈ 8.4 МэВ для ядра с А2 = 110). При этом должна выделяться энергия Е = А(e2− e1) ≈ 220(8.4 − 7.6) МэВ ≈ 180 МэВ.    Энергия E, освобождающаяся в одном акте деления, может быть получена непосредственно из формулы (7.1) и определяется для двух осколков с массовым числом A2 = A/2 и зарядом Z2 = Z/2 соотношением

|  |  |
| --- | --- |
| E = 2ΔW2  – ΔW. | (7.2) |

    Используя соотношения (7.1) и (7.2) и пренебрегая последним членом a5A-3/4 вследствие его малости, получаем величину энергии, выделяющейся при симметричном делении ядра A = 240, Z = 90.http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/images/egract07_01.gifПри делении изменяется поверхностная энергия Eп = a2A2/3 и кулоновская энергия Eк = a3Z2/A1/3, при этом поверхностная энергия увеличивается, а кулоновская энергия уменьшается. Деление возможно только в том случае, когда E > 0, т.е. когда

|  |  |
| --- | --- |
| Eк/Eк = (a3Z2/A1/3)/(a2A2/3) > 0.7, | (7.3) |

откуда следует, что *Z*2/*A* > 17. Величина Z2/A называется**параметром деления.**  |

|  |
| --- |
| **Деление ядер. История**1934 г. − [Э. Ферми](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/fermi.htm), облучая уран тепловыми нейтронами, обнаружил среди продуктов реакции радиоактивные ядра, природу которых установить не удалось.[Л. Сцилард](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/szilard_leo.htm) выдвинул идею цепной ядерной реакции.1939 г. − [О. Ган](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/hahn.htm) и [Ф. Штрассман](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/strassmann_fritz.htm) обнаружили среди продуктов реакций барий.[Л. Мейтнер](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/meitner.htm) и [О. Фриш](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/frisch_otto.htm) впервые объявили, что под действием нейтронов происходило деление урана на два сравнимых по массе осколка.[Н. Бор](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/bohr_n.htm) и [Дж. Уилер](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/wheeler.htm) дали количественную интерпретацию деления ядра, введя параметр деления.[Я. Френкель](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/frenkel_iakov.htm) развил капельную теорию деления ядер медленными нейтронами.[Л. Сцилард](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/szilard_leo.htm), [Э. Вигнер](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/wigner.htm), [Э. Ферми](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/fermi.htm), [Дж. Уилер](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/wheeler.htm), [Ф. Жолио-Кюри](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/joliot-curie_frederic.htm), [Я. Зельдович](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/zeldovich.htm),[Ю. Харитон](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/khariton_july.htm) обосновали возможность протекания в уране цепной ядерной реакции деления.1940 г. − [Г. Флеров](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/flerov.htm) и [К. Петржак](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/petrzhak_konstantin.htm) открыли явление спонтанного деления ядер 235U.1942 г. − [Э. Ферми](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/fermi.htm) осуществил управляемую цепную реакцию деления в первом атомного реакторе.1945 г. − Первое испытание ядерного оружия (штат Невада, США). На японские города Хиросима (6 августа) и Нагасаки (9 августа) американскими войсками были сброшены атомные бомбы.1946 г. − Под руководством [И.В. Курчатова](http://nuclphys.sinp.msu.ru/persons/pages/kurchatov.htm) был пущен первый в Европе реактор.1954 г. − Запущена первая в мире атомная электростанция (г. Обнинск, СССР). |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|     Энергия E, высвобождающаяся при делении, растет с увеличением Z2/A. Величина Z2/A = 17 для89Y (иттрия). Т.е. деление энергетически выгодно для всех ядер тяжелее иттрия. Почему же большинство ядер устойчиво по отношению к самопроизвольному делению? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо рассмотреть механизм деления.

|  |
| --- |
| Рис.2Рис. 7.1. Изменение формы ядра в процессе деления. |

    В процессе деления происходит изменение формы ядра. Ядро последовательно проходит через следующие стадии (рис. 7.1): шар, эллипсоид, гантель, два грушевидных осколка, два сферических осколка. Как при этом изменяется потенциальная энергия ядра на различных стадиях деления?    Первоначальное ядро с увеличением *r* принимает форму все более вытянутого эллипсоида вращения. В этом случае вследствие эволюции формы ядра изменение его потенциальной энергии определяется изменением суммы поверхностной и кулоновской энергий Eп + Eк. Поверхностная энергия при этом возрастает, так как увеличивается площадь поверхности ядра. Кулоновская энергия уменьшается, так как увеличивается среднее расстояние между протонами. Если при незначительной деформации, характеризующейся малым параметром http://nuclphys.sinp.msu.ru/simages/kappa.gif, исходное ядро приняло форму аксиально симметричного эллипсоида, поверхностная энергия E'п и кулоновская энергия E'к как функции параметра деформации http://nuclphys.sinp.msu.ru/simages/kappa.gif изменяются следующим образом:

|  |  |
| --- | --- |
| http://nuclphys.sinp.msu.ru/fission/images/f03.gif | (7.4) |

а их сумма, определяющая изменение потенциальной энергии ядра, равна

|  |  |
| --- | --- |
| Е'п + Е'к neaeq.gif (64 bytes)Еп + Ек + http://nuclphys.sinp.msu.ru/simages/kappa.gif2(2 Еп - Ек)/5. | (7.5) |

    В соотношениях (7.4–7.5) *E*п и *E*к – поверхностная и кулоновская энергии исходного сферически симметричного ядра.    В области тяжелых ядер 2Eп > Eк и сумма поверхностной и кулоновской энергий растет с увеличением http://nuclphys.sinp.msu.ru/simages/kappa.gif. Из (7.4) и (7.5) следует, что при малых деформациях рост поверхностной энергии препятствует дальнейшему изменению формы ядра, а следовательно, и делению.    Соотношение (7.5) справедливо для малых деформаций http://nuclphys.sinp.msu.ru/simages/kappa.gif. Если деформация настолько велика, что ядро принимает форму гантели, то поверхностные и кулоновские силы, стремятся разделить ядро и придать осколкам сферическую форму. Таким образом, при постепенном увеличении деформации ядра его потенциальная энергия проходит через максимум. График изменения поверхностной и кулоновской энергий ядра в зависимости от r показан на рис. 7.2.

|  |
| --- |
| Рис.4Рис. 7.2. Изменение поверхностной и кулоновской энергий ядра в процессе деления. |

    Наличие потенциального барьера препятствует мгновенному самопроизвольному делению ядер. Для того чтобы ядро разделилось, ему необходимо сообщить энергию Q, превышающую высоту барьера деления H. Максимум потенциальной энергии делящегося ядра E + H (например золота) на два одинаковых осколка ≈ 173 МэВ, а величина энергии E, освобождающейся при делении, равна 132 МэВ. Таким образом, при делении ядра золота необходимо преодолеть потенциальный барьер высотой около 40 МэВ.    Высота барьера деления H тем больше, чем меньше отношение кулоновской и поверхностной энергии Ек/Епв начальном ядре. Это отношение, в свою очередь, увеличивается с увеличением параметра деления Z2/А (7.3). Чем тяжелее ядро, тем меньше высота барьера деления H, так как параметр деления в предположении, что Z пропорционально A, увеличивается с ростом массового числа:

|  |  |
| --- | --- |
| Ек/Еп = (a3Z2)/(a2A) ~ A. | (7.6) |

    Поэтому более тяжелым ядрам, как правило, нужно сообщить меньшую энергию, чтобы вызвать деление ядра.    Высота барьера деления обращается в нуль при 2Eп – Eк = 0 (7.5). В этом случае2Eп/Eк = 2(a2A)/(a3Z2),откудаZ2/A = 2a2/(a3Z2) ≈ 49.    Таким образом, согласно капельной модели в природе не могут существовать ядра с Z2/A > 49, так как они должны практически мгновенно за характерное ядерное время порядка 10–22 с самопроизвольно разде­литься на два осколка. Зависимости формы и высоты потенциального барьера H, а также энергии деления от величины параметра Z2/A показаны на рис. 7.3.Рис.5Рис. 7.3. Радиальная зависимость формы и высоты потенциального барьера и энергии деления E при различных величинах параметра Z2/A. На вертикальной оси отложена величина Eп + Eк.    Самопроизвольное деление ядер с Z2/A < 49, для которых высота барьера H не равна нулю, с точки зрения классической физики невозможно. Однако в квантовой механике такое деление возможно за счет туннельного эффекта – прохождения осколков деления через потенциальный барьер. Оно носит название спонтанного деления. Вероятность спонтанного деления растет с увеличением параметра деления Z2/A, т. е. с уменьшением высоты барьера деления. В целом период спонтанного деления уменьшается при переходе от менее тяжелых ядер к более тяжелым от T1/2 > 1021 лет для 232Th до 0,3 с для 260Rf.    Вынужденное деление ядер с Z2/A < 49 может быть вызвано их возбуждением фотонами, нейтронами, протонами, дейтронами, a частицами и другими частицами, если вносимая в ядро энергия достаточна для преодоления барьера деления.    Минимальное значение энергии возбуждения составного ядра E\*, образующегося при захвате нейтрона равно энергии связи нейтрона в этом ядре εn. В таблице 7.1 сравниваются высота барьера H и энергия связи нейтрона εn для изотопов Th, U, Pu, образующихся после захвата нейтрона. Энергия связи нейтрона зависит от числа нейтронов в ядре. За счёт энергии спаривания энергия связи четного нейтрона больше энергии связи нечетного нейтрона.Таблица 7.1**Высота барьера деления H, энергия связи нейтрона εn**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Изотоп** | **Высота барьера деления H, МэВ** | **Изотоп** | **Энергия связи нейтрона εn** |
| 232Th | 5.9 | 233Th | 4.79 |
| 233U | 5.5 | 234U | 6.84 |
| 235U | 5.75 | 236U | 6.55 |
| 238U | 5.85 | 239U | 4.80 |
| 239Pu | 5.5 | 240Pu | 6.53 |

|  |
| --- |
| Рис.8Рис. 7.4. Массовое распределение осколков деления 235U тепловыми нейтронами. |

   Характерной особенностью деления является то, что осколки, как правило, имеют различные массы. В случае наиболее вероятного деления 235U отношение масс осколков в среднем равно ~ 1.5. Распределение по массам осколков деления 235U тепловыми нейтронами показано на рис. 7.4. Для наиболее вероятного деления тяжелый осколок имеет массовое число 139, легкий – 95. Среди продуктов деления имеются осколки с A = 72 – 161 и Z = 30 – 65. Вероятность деления на два равных по массе осколка не равна нулю. При делении235U тепловыми нейтронами вероятность симметричного деления примерно на три порядка меньше, чем в случае наиболее вероятного деления на осколки с A = 139 и 95.    Асимметричное деление объясняется оболочечной структурой ядра. Ядро стремится разделиться таким образом, чтобы основная часть нуклонов каждого осколка образовала наиболее устойчивый магический остов.    Отношение числа нейтронов к числу протонов в ядре 235U N/Z = 1.55, в то время как у стабильных изотопов, имеющих массовое число, близкое к массовому числу осколков, это отношение 1.25 − 1.45. Следовательно, осколки деления оказываются сильно перегружеными нейтронами и должны быть β- радиоактивны. Поэтому, осколки деления испытывают последовательные β--распады, причем заряд первичного осколка может изменяться на 4 − 6 единиц. Ниже приведена характерная цепочка радиоактивных распадов 97Kr – одного из осколков, образующегося при делении 235U:http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/images/egract07_02.gif    Возбуждение осколков, вызванное нарушением соотношения числа протонов и нейтронов, характерного для стабильных ядер, снимается также за счет вылета мгновенных нейтронов деления. Эти нейтроны испускаются движущимися осколками за время, меньшее, чем ~ 10-14 с. В среднем в каждом акте деления испускается 2 − 3 мгновенных нейтрона. Их энергетический спектр непрерывный с максимумом около 1 МэВ. Средняя энергия мгновенного нейтрона близка к 2 МэВ. Испускание более чем одного нейтрона, в каждом акте деления делает возможным получение энергии за счет цепной ядерной реакции деления.    При наиболее вероятном делении 235U тепловыми нейтронами лёгкий осколок (A = 95) приобретает кинетическую энергию ≈ 100 МэВ, а тяжёлый (A = 139) – около 67 МэВ. Таким образом, суммарная кинетическая энергия осколков ≈ 167 МэВ. Полная энергия деления в данном случае составляет 200 МэВ. Таким образом, оставшаяся энергия (33 МэВ) распределяется между другими продуктами деления (нейтроны, электроны и антинейтрино β--распада осколков, γ-излучение осколков и продуктов их распада). Распределение энергии деления между различными продуктами при делении 235U тепловыми нейтронами дано в таблице 7.2.Таблица 7.2**Распределение энергии деления 235U тепловыми нейтронами**

|  |  |
| --- | --- |
| Кинетическая энергия осколков | 167 МэВ |
| Мгновенные нейтроны | 5 МэВ |
| Электроны β--распада | 5 МэВ |
| Антинейтрино β--распада | 10 МэВ |
| Мгновенное γ-излучение | 7 МэВ |
| γ-Излучение продуктов распада | 6 МэВ |
| Полная энергия деления | 200 МэВ |

    Продукты ядерного деления (ПЯД) представляют собой сложную смесь более чем 200 радиоактивных изотопов 36 элементов (от цинка до гадолиния). Большую часть ак­тивности составляют короткоживущие радионуклиды. Так, через 7, через 49 и через 343 суток после взрыва активность ПЯД снижается соответственно в 10, 100 и 1000 раз по сравнению с активностью через час после взрыва. Выход наиболее биологически зна­чимых радионуклидов приведен в таблице 7.3. Кроме ПЯД радиоактивное загрязнение обусловлено радионуклидами наведенной активности (3H,14C, 28Al, 24Nа, 56Mn, 59Fe , 60Cо и др.) и неразделившейся частью урана и плутония. Особенно велика роль наведен­ной активности при термоядерных взрывах.Таблица 7.3**Выход некоторых продуктов деления при ядерном взрыве**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Радио­нуклид** | **Период полураспада** | **Выход на одно деление, %** | **Активность на 1 Мт, 1015 Бк** |
| 89Sr | 50.5 сут. | 2.56 | 590 |
| 90Sr | 29.12 лет | 3.5 | 3.9 |
| 95Zr | 65 сут. | 5.07 | 920 |
| 103Ru | 41 сут. | 5.2 | 1500 |
| 106Ru | 365 сут. | 2.44 | 78 |
| 131I | 8.05 сут. | 2.9 | 4200 |
| 136Cs | 13.2 сут. | 0.036 | 32 |
| 137Cs | 30 лет | 5.57 | 5.9 |
| 140Ba | 12.8 сут. | 5.18 | 4700 |
| 141Cs | 32.5 сут. | 4.58 | 1600 |
| 144Cs | 288 сут. | 4.69 | 190 |
| 3H | 12.3 лет | 0.01 | 2.6·10-2 |

    При ядерных взрывах в атмосфере значительная часть осадков (при наземных взрывах до 50%) выпадает вблизи района испытаний. Часть радиоактивных веществ задерживается в нижней части атмосферы и под действием ветра перемещается на большие расстояния, оставаясь примерно на одной и той же широте. Находясь в воздухе примерно месяц, радиоактивные вещества во время этого перемещения постепенно выпадают на Землю. Большая часть радионуклидов выбрасывается в стратосферу (на высоту 10÷15 км), где происходит их глобальное рассеивание и в значительной степени распад.    Высокую активность в течение десятков лет имеют различные элементы конструкции ядерных реакторов (таблица 7.4)Таблица 7.4**Значения удельной активности (Бк/т урана) основных продуктов деления в тепловыделяющих элементах, извлеченных из реактора после трехлетней эксплуатации**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Радионуклид** | **0** | **1 сут.** | **120 сут.** | **1 год** | **3 года** | **10 лет** |
| 85Kr | 5*.*78*·*1014 | 5*.*78*·*1014 | 5*.*66*·*1014 | 5*.*42*·*1014 | 4*.*7*·*1014 | 3*.*03*·*1014 |
| 89Sr | 4*.*04*·*1016 | 3*.*98*·*1016 | 5*.*78*·*1015 | 2*.*7*·*1014 | 1*.*2*·*1010 |   |
| 90Sr | 3*.*51*·*1015 | 3*.*51*·*1015 | 3*.*48*·*1015 | 3*.*43*·*1015 | 3*.*26*·*1015 | 2*.*75*·*1015 |
| 95Zr | 7*.*29*·*1016 | 7*.*21*·*1016 | 1*.*99*·*1016 | 1*.*4*·*1015 | 5*.*14*·*1011 |   |
| 95Nb | 7*.*23*·*1016 | 7*.*23*·*1016 | 3*.*57*·*1016 | 3*.*03*·*1015 | 1*.*14*·*1012 |   |
| 103Ru | 7*.*08*·*1016 | 6*.*95*·*1016 | 8*.*55*·*1015 | 1*.*14*·*1014 | 2*.*97*·*108 |   |
| 106Ru | 2*.*37*·*1016 | 2*.*37*·*1016 | 1*.*89*·*1016 | 1*.*19*·*1016 | 3*.*02*·*1015 | 2*.*46*·*1013 |
| 131I | 4*.*49*·*1016 | 4*.*19*·*1016 | 1*.*5*·*1012 | 1*.*01*·*103 |   |   |
| 134Cs | 7*.*50*·*1015 | 7*.*50*·*1015 | 6*.*71*·*1015 | 5*.*36*·*1015 | 2*.*73*·*1015 | 2*.*6*·*1014 |
| 137Cs | 4*.*69*·*1015 | 4*.*69*·*1015 | 4*.*65*·*1015 | 4*.*58*·*1015 | 4*.*38*·*1015 | 3*.*73*·*1015 |
| 140Ba | 7*.*93*·*1016 | 7*.*51*·*1016 | 1*.*19*·*1014 | 2*.*03*·*108 |   |   |
| 140La | 8*.*19*·*1016 | 8*.*05*·*1016 | 1*.*37*·*1014 | 2*.*34*·*108 |   |   |
| 141Ce | 7*.*36*·*1016 | 7*.*25*·*1016 | 5*.*73*·*1015 | 3*.*08*·*1013 | 5*.*33*·*106 |   |
| 144Ce | 5*.*44*·*1016 | 5*.*44*·*1016 | 4*.*06*·*1016 | 2*.*24*·*1016 | 3*.*77*·*1015 | 7*.*43*·*1012 |
| 143Pm | 6*.*77*·*1016 | 6*.*70*·*1016 | 1*.*65*·*1014 | 6*.*11*·*108 |   |   |
| 147Pm | 7*.*05·1015 | 7*.*05*·*1015 | 6*.*78*·*1015 | 5*.*68*·*1015 | 3*.*35*·*1014 |   |

  |

|  |
| --- |
| **Открытие деления ядер. 1939 г.**    Я приехал в Швецию, где Лизе Мейтнер страдала от одиночества, и я, как преданный племянник, решил навестить ее на рождество. Она жила в маленьком отеле Кунгэльв около Гетеборга. Я застал ее за завтраком. Она обдумывала письмо, только что полученное ею от Гана. Я был весьма скептически настроен относительно содержания письма, в котором сообщалось об образовании бария при облучении урана нейтронами. Однако ее привлекла такая возможность. Мы гуляли по снегу, она пешком, я на лыжах (она сказала, что может проделать этот путь, не отстав от меня, и доказала это). К концу прогулки мы уже могли сформулировать некоторые выводы; ядро не раскалывалось, и от него не отлетали куски, а это был процесс, скорее напоминавший капельную модель ядра Бора; подобно капле ядро могло удлиняться и делиться. Затем я исследовал, каким образом электрический заряд нуклонов уменьшает поверхностное натяжение, которое, как мне удалось установить, падает до нуля при Z*=*100 и, возможно, весьма мало для урана. Лизе Мейтнер занималась определением энергии, выделяющейся при каждом распаде из-за дефекта массы. Она очень ясно представляла себе кривую дефекта масс. Оказалось, что за счет электростатического отталкивания элементы деления приобрели бы энергию около 200 МэВ*,*а это как раз соответствовало энергии, связанной с дефектом массы. Поэтому процесс мог идти чисто классически без привлечения понятия прохождения через потенциальный барьер, которое, конечно, оказалось бы тут бесполезным.    Мы провели вместе два или три дня на рождество. Затем я вернулся в Копенгаген и едва успел сообщить Бору о нашей идее в тот самый момент, когда он уже садился на пароход, отправляющийся в США. Я помню, как он хлопнул себя по лбу, едва я начал говорить, и воскликнул: «О, какие мы были дураки! Мы должны были заметить это раньше». Но он не заметил, и никто не заметил.    Мы с Лизе Мейтнер написали статью. При этом мы постоянно поддерживали связь по междугородному телефону Копенгаген – Стокгольм.О. Фриш, Дж. Уиллер. УФН. 1968. Т. 96, вып.4, с. 697. |

|  |
| --- |
| **Спонтанное деление ядер**    В описанных ниже опытах мы использовали метод, впервые предложенный Фришем для регистрации процессов деления ядер. Ионизационная камера с пластинами, покрытыми слоем окиси урана, соединяется с линейным усилителем, настроенным таким образом, что α-частицы, вылетающие из урана, не регистрируются системой; импульсы же от осколков, намного превышающие по величине импульсы от α-частиц, отпирают выходной тиратрон и считаются механическим реле.    Была специально сконструирована ионизационная камера в виде многослойного плоского конденсатора с общей площадью 15 пластин в 1000 см. Пластины, расположенные друг от друга на расстоянии 3 мм, были покрыты слоем окиси урана 10-20 мг/см2.    В первых же опытах с настроенным для счета осколков усилителем удалось наблюдать самопроизвольные (в отсутствие источника нейтронов) импульсы на реле и осциллографе. Число этих импульсов было невелико (6 в 1 час), и вполне понятно поэтому, что это явление не могло наблюдаться с камерами обычного типа…    Мы склонны думать, что *наблюдаемый нами эффект следует приписать осколкам, получающимся в результате**спонтанного деления урана…*    Спонтанное деление следует приписать одному из невозбужденных изотопов U с периодами полураспада, полученными из оценки наших результатов:U238 – 1016 ~ 1017 лет,U235 – 1014 ~ 1015 лет,U234 – 1012 ~ 1013 лет.К.А. Петржак, Г.Н. Флеров. УФН. 1941. Т. 25, вып. 2. с. 241.Опубликовано: ЖЭТФ. 1940. Т. 10. С. 1013. |

|  |
| --- |
|   |