

Измерения.

В 2006 году было проведено несколько облучений образца из естественной смеси изотопов урана тормозными гамма - квантами от ускорителя электронов. Ускоритель электронов - РТМ 70.

Номер облучения	Энергия, МэВ	Начало облучения	Окончание измерения
2	19.5	2006-10-31 13:25	2006-10-31 17:00
3	29.1	2006-11-09 16:15	2006-11-09 19:15
5	43.5	2006-11-20 15:00	2006-11-20 18:40
7	48.3	2006-12-25 09:45	2006-12-25 17:15
8	67.7	2007-02-15 12:05	2007-02-15 17:12

Таблица 1. Облучения.

Было проведено пять облучений (Табл. 1.). После каждого облучения в течении нескольких дней на детекторе из сверхчистого германия измерялись спектры остаточной активности уранового образца. По этим спектрам требуется провести расшифровку пиков полного поглощения, чтобы определить ядра - осколки получившиеся при делении. Из анализа динамики этих фотопиков нужно получить выходы различных изотопов. Заключительной стадией обработки является построение зарядовых распределений ядер - осколков с одинаковым массовым числом, определение параметров этих распределений (таких как ширина и эффективный заряд) и построение массовых распределений фотоделения при различных энергиях облучения.

Облучение 2. $E = 19.5$ МэВ

После второго облучения было измерено 458 спектров. Проведенные измерения позволяют нам определять изотопы с периодом полураспада от нескольких минут до нескольких дней.

Номер измерения	Число измерений	Время измерения	Общее время	Время на конец
1 - 10	10	2 мин	20 мин	
11 - 19	9	5 мин	45 мин	65 мин
20 - 40	21	10 мин	3ч 30 мин	4 ч 35 мин
41 - 458	418	30 мин	209 ч	8.71 д

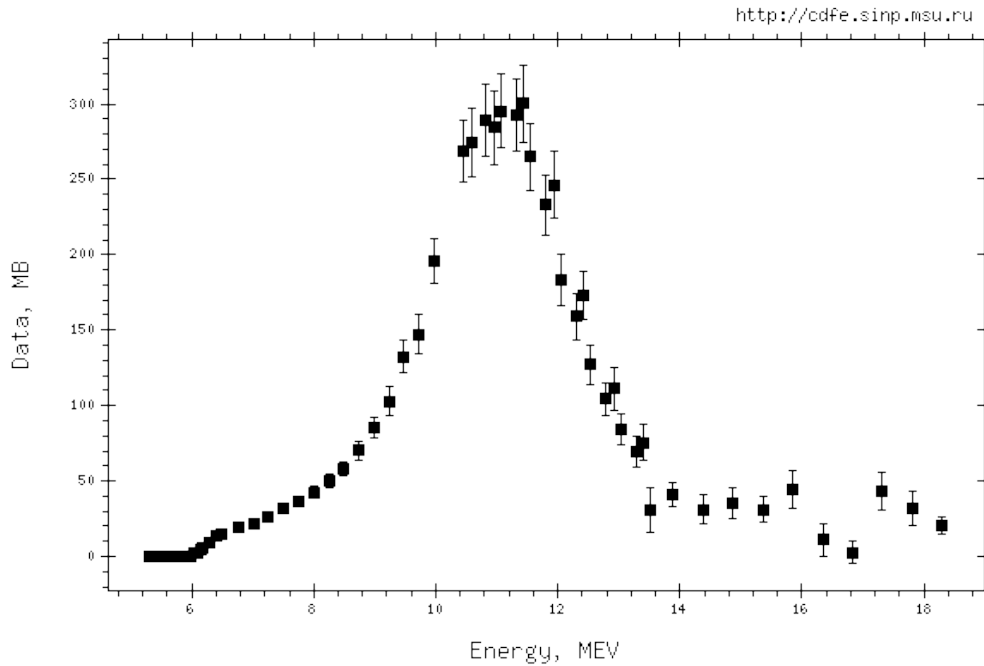
Таблица 2. Серии измерений после облучения N2.

Определение выходов.

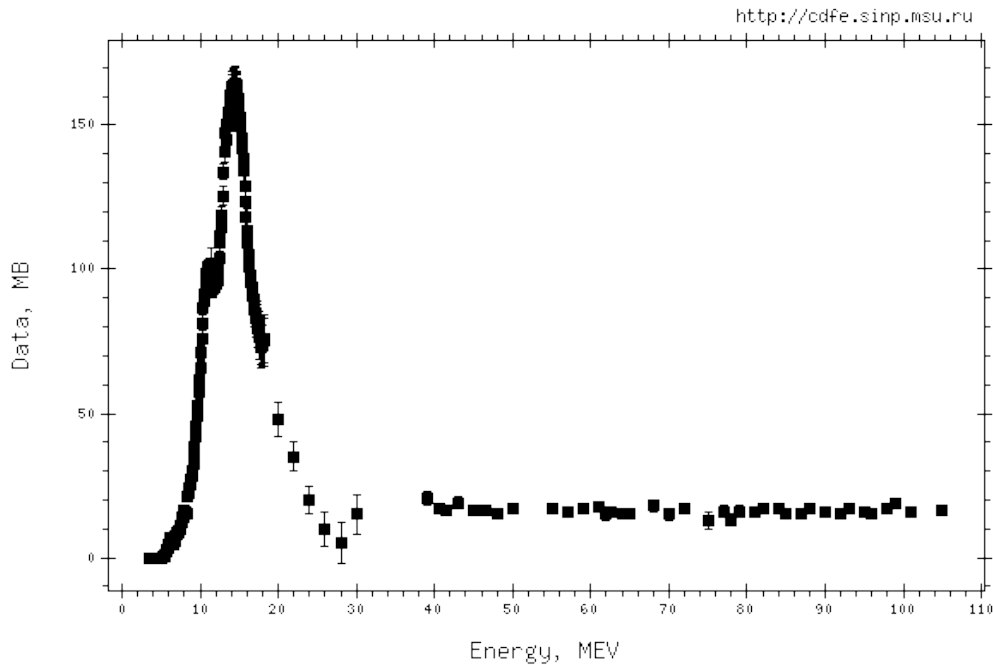
После расшифровки фотопиков в спектрах, необходимо определить выходы различных осколков. Наша методика на данный момент позволяет определять относительные выходы по разным каналам реакций. Помимо реакции фотоделения при энергиях в нашем эксперименте могут происходить фотоядерные реакции с вылетом до нескольких нуклонов. Выходы мы будем рассчитывать относительно реакции (γ, n) на ядре $^{238}_{92}\text{U}$. Поэтому сначала рассмотрим как получить выходы для этой реакции.

Реакция $^{238}_{92}\text{U}(\gamma, n)^{237}_{92}\text{U}$.

Данная реакция наблюдается во всех наших облучениях. Причиной этого является то, что процентное содержание изотопа $^{238}_{92}\text{U}$ в естественной смеси - 99,7%. Также наши эксперименты проводятся при энергиях выше порога этой реакции. Выход этой реакции будет использоваться нами как нормировка для выходов по каналу деления.



На рис. 1. показано сечение реакции $^{238}_{92}\text{U}(\gamma, n)^{237}_{92}\text{U}$. На рис. 2. приведено сечение $^{238}_{92}\text{U}(\gamma, F)$.



В результате реакции $^{238}_{92}\text{U}(\gamma, n)^{237}_{92}\text{U}$ получается радиоактивное ядро $^{237}_{92}\text{U}$. Это ядро β^- радиоактивно с периодом полураспада 6.75 дней. После β^- распада ядра $^{237}_{92}\text{U}$ образуется ядро $^{237}_{93}\text{Np}$ в возбужденном состоянии. Снятие возбуждения происходит путем испускания гамма - квантов. Линии которые мы видим в наших спектрах это гамма - переходы между уровнями ядра $^{237}_{93}\text{Np}$. По этим пикам мы и определяем наличие ядра $^{237}_{92}\text{U}$, и по их эволюции рассчитываем выход реакции $^{238}_{92}\text{U}(\gamma, n)^{237}_{92}\text{U}$. На рис.3. показана схема распада ядра $^{237}_{92}\text{U}$. (В дальнейшем мы будем говорить гамма - кванты ядра $^{237}_{92}\text{U}$.)

Для начала необходимо определить значение площади пика полного поглощения в различные промежутки времени и построить кривую распада. Фитируя кривую распада мы получим период. Период распада $^{237}_{92}\text{U}$ - 6.75 дней. Возьмем серию из 7 измерений по 30 часов каждое и определим значение площади пика в каждом измерении. Мы берем равномерные измерения по времени.

Измерение	t_2 , hour	t_3 , hour	Area	Err Area
1	3,75	33,75	60001	322
2	63,75	93,75	54028	295
3	123,75	153,75	44919	278
4	183,75	213,75	38467	264
5	243,75	273,75	34983	247
6	303,75	333,75	28898	256
7	363,75	393,75	23173	243

Таблица 3. Распад линии 59.5 КэВ.

t_2 - время начала измерения, отсчитывается от момента окончания облучения.

t_3 - время окончания данного измерения, отсчитывается от момента окончания облучения.

Оценим период полураспада для этой гамма линии. Для этого нужно аппроксимировать кривую распада (точки в таблице 3) функцией:

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t_2}{T_{1/2}}}$$

, где параметрами являются N_0 и $T_{1/2}$.

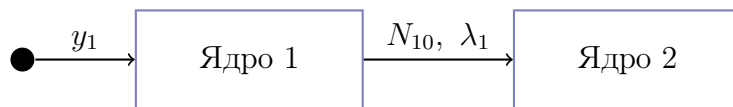
Для фитирования можно использовать специальные программы. Например Origin или Fityk.

Результат работы программы Fityk.

Параметры
$N_0 = 72696.5 \pm 1846.68$
$T_{1/2} = 137.005 \pm 6.00973$

Период полураспада с хорошей точностью совпадает с табличным значением периода полураспада для изотопа $^{237}_{92}\text{U}$.

Определение выхода реакции $^{238}_{92}\text{U}(\gamma, n)^{237}_{92}\text{U}$. Один канал образования ядра



Уравнение описывающее изменение количества радиоактивных ядер во время и после облучения имеет вид:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 + y_1$$

или

$$dN_1 = -\lambda_1 N_1 dt + y_1 dt$$

где N_1 - число радиоактивных ядер,

λ - постоянная распада,

y_1 - выход реакции. Смысл выхода - число реакций данного типа, происходящих в образце в единицу времени.

Рассмотрим изменение числа радиоактивных ядер на графике:

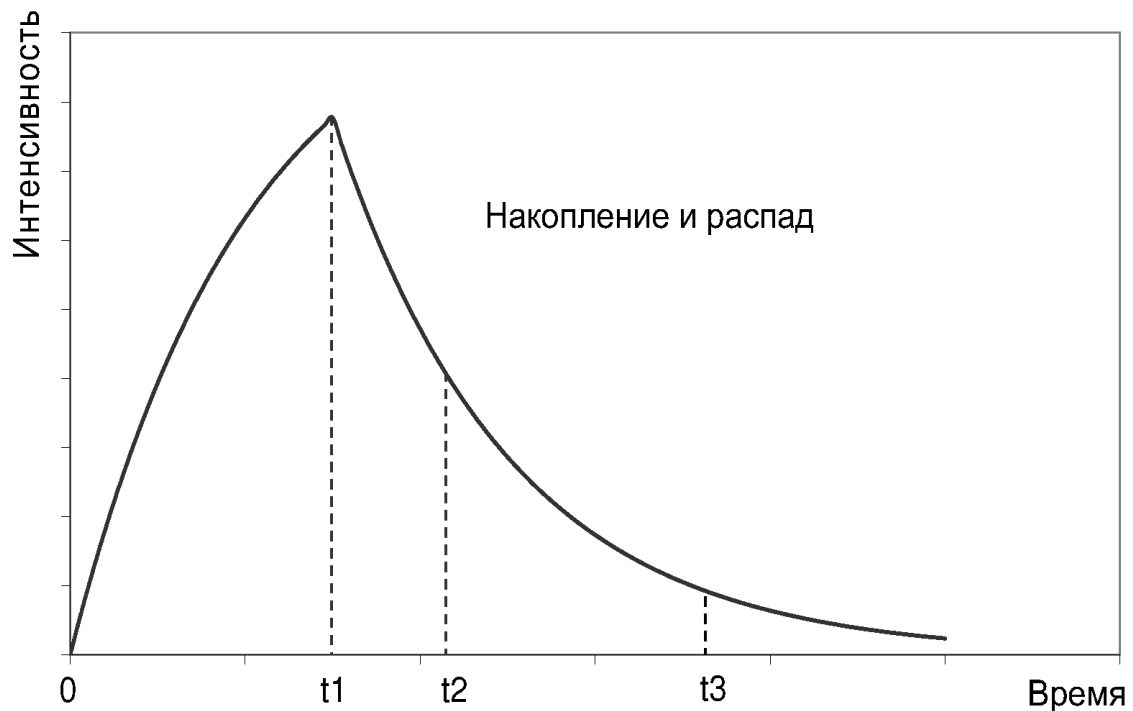


Рисунок 4. Изменение количества радиоактивных ядер в процессе облучения и после него.

На графике момент времени $t = 0$ - начало облучения, t_1 - окончание облучения, t_2 - начало измерения спектров, t_3 - окончание измерения.

В промежутке времени $0 - t_1$ происходит накопление и распад изотопов. При $t > t_1$ только распад. В промежутке $t_2 - t_3$ - происходит измерение спектров, с целью получить выход.

Измерение спектров происходит в промежутке времени $t > t_1$. Для этого случая уравнение изменения количества радиоактивных ядер примет вид:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

Решение этого уравнения представляет собой просто закон радиоактивного распада:

$$N_1(t) = N_{10} \cdot e^{-\lambda_1 t}$$

Напомним, что $N_1(t)$ - количество нераспавшихся радиоактивных ядер, N_{10} - число радиоактивных ядер на момент окончания измерения (в момент времени t_1).

В гамма - активационных экспериментах измеряется число распадов радиоактивных ядер за какой - то промежуток времени (пропорционально площади пика). Допустим наше измерение происходит в промежутке времени от t_2 до t_3 . Не забудем также о том что детектор регистрирует не все гамма кванты, попавшие на него, а также то, что гамма - кванты при распаде ядер излучаются лишь с некоторой вероятностью. Поэтому введем нормировочный коэффициент k_1 . Тогда число распадов, которые мы зафиксируем на детекторе (площадь пика) будет:

$$\begin{aligned} S &= k_1 \int_{t_1}^{t_2} \lambda_1 N_1(t) = k_1 \int_{t_1}^{t_2} \lambda_1 N_{10} \cdot e^{-\lambda_1 t} = \\ &= k_1 N_{10} (e^{-\lambda_1 t_2} - e^{-\lambda_1 t_3}) \end{aligned}$$

$$k_1 = E_\gamma \cdot I_\gamma$$

где E_γ - эффективность регистрации гамма - кванта с определенной энергией детектором. (см. Приложение 1.)

I_γ - квантовый выход для данной гамма линии (вероятность испускания гамма - кванта с определенной энергией). Он определяется вероятностью распада на определенный уровень и вероятностью гамма - перехода при распаде. Обычно приводится в таблицах распада (см. <http://ie.lbl.gov/toi/>).

Фитируя этой функцией данные по изменению площади в процессе измерения и используя N_{10} в качестве параметра мы получим значение количества ядер на момент окончания облучения.

Если мы имеем только данные по площади пика за какой то один большой временной промежуток, то можно число ядер на момент окончания облучения просто посчитать по формуле.

$$N_{10} = \frac{S}{k_1 (e^{-\lambda_1 t_2} - e^{-\lambda_1 t_3})}$$

Далее определим выход реакции.

Для получения выхода запишем уравнение изменения количества радиоактивных ядер при $t < t_1$:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1 + y_1$$

В общем случае это уравнение можно решить, если записать его в виде

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1(t) + f(t)$$

(см. <http://depni.sinp.msu.ru/~hatta/metodika.pdf>)

Тогда решение будет записано в виде:

$$N_1(t) = e^{-\lambda_1 t} \left(\int f(t) e^{\lambda_1 t} dt + C_1 \right)$$

В нашем $f(t) = y_1$ - не зависит от времени. Мы считаем, что ток ускорителя во время облучения не менялся. Тогда для момента времени $t = t_1$ получим решение:

$$N_1(t_1) = e^{-\lambda_1 t_1} \left(\int_0^{t_1} y_1 e^{\lambda_1 t} dt + C \right) = N_{10}$$

Постоянная $C = 0$. Это следует из того, что до начала облучения в образце не было радиоактивных ядер 1.

$$N_{10} = e^{-\lambda_1 t_1} \cdot y_1 \cdot \frac{1}{\lambda_1} (e^{\lambda_1 t_1} - 1)$$

Тогда для выхода получим формулу:

$$y_1 = \frac{N_{10} \cdot \lambda_1}{e^{-\lambda_1 t_1} (e^{\lambda_1 t_1} - 1)} = \frac{N_{10} \cdot \lambda_1}{(1 - e^{-\lambda_1 t_1})}$$

Таким образом, для того чтобы определить выхода нам сначала надо по максимальному набору спектров определить количество образовавшихся ядер на момент окончания облучения (процедура фитирования).

Строго говоря, при определении выхода нужно ввести еще некоторые поправки. В объеме образца происходит поглощение испущенных им же гамма - квантов - самопоглощение. И в зависимости от энергии гамма - квантов самопоглощение будет иметь различные значения. В этом эксперименте мы не учитываем самопоглощение, так как образец очень тонкий (напыленный уран). Учет самопоглощения можно провести, используя моделирование на GEANT4. Также нужно учесть поправку на мертвое время детектора. При измерении спектров облученного урана мертвое время детектора было порядка десятой доли процента от живого времени, такую маленькую поправку можно не рассматривать.

У нас имеется формула для изменения количества радиоактивных ядер после облучения и количество ядер на момент окончания облучения и формула для выхода реакции. Для последующих вычислений нам понадобится понять как изменится количество ядер во время облучения:

$$N_1(t) = e^{-\lambda_1 t_1} \int_0^{t_1} y_1 e^{\lambda_1 t} dt = N_{10}, \text{ при } t < t_1$$

$$N_1(t) = \frac{y_1}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t}) = N_{10} \frac{(1 - e^{-\lambda_1 t})}{(1 - e^{-\lambda_1 t_1})}$$

Соответственно в момент времени $t = 0$ число ядер $N_1(0) = 0$, а $N_1(t_1) = N_{10}$.

Результаты для реакция ${}^{238}_{92}\text{U}(\gamma, n){}^{237}_{92}\text{U}$.

В этом разделе будут приведены результаты по реакции ${}^{238}_{92}\text{U}(\gamma, n){}^{237}_{92}\text{U}$. Периоды полураспада по линиям и выходы этой реакции.