Доклады Академии наук СССР
1955. Том 103, № 4

ФИЗИКА

Н. С. ИВАНОВА, Н. А. ПЕРФИЛОВ и В. П. ШАМОВ

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 460 Мэв *

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 20 V 1955)

При взаимодействии частиц с энергией 460 Мэв с тяжелым ядром можно ожидать развития, в первую очередь, ядерно-каскадного процесса в ядре; в результате из ядра могут вылетать быстрые частицы, оставив последнее в возбужденном состоянии. Возбужденное ядро будет терять энергию возбуждения путем испарения частиц, испытывая деление на той или иной степени возбуждения.

Наблюдение случаев деления, произведенных протонами с энергией 460 Мэв в фотоэмульсиях большой чувствительности, дает полную картину явления, так как здесь регистрируются как первая стадия процесса, связанная с вылетом очень быстрых заряженных частиц, так и последующие, связанные с испусканием сравнительно медленных частиц и делением ядра.

В наших опытах пластинки с введенным внутрь ураном облучались протонами с $E = 460$ Мэв, проявлялись глубинным температурным способом и просматривались под микроскопом. Применялись два типа пластинок: электронно-чувствительные Ильфорд G-5 и НИКФИ с пределом чувствительности на протонах 80—90 Мэв.

На электронно-чувствительной эмульсии найдено всего 46 делений. Обнаружено, что почти каждое деление ядра урана (83%) сопровождается вылетом легких заряженных частиц. Максимальное число одновременно наблюдавшихся нами вылетавших при делении легких заряженных частиц равняется шести (см. микрофотографию, рис. 1 на вклейке).

Получено следующее распределение случаев по числу вылетевших легких заряженных частиц:

Число лучей	0	1	2	3	4	5	6
Число случаев	8	16	11	8	2	—	1
В % к общему числу делений	17,3	34	29	17	42	—	2,1

В среднем на 1 деление приходится 1,65 частиц. На эмульсии типа НИКФИ найдено всего 102 деления. На этой эмульсии в среднем приходится 1 частица на деление. Сравнение двух средних значений показывает, что при каждом делении в среднем вылетает 0,65 частиц (40%) с энергией больше 80—90 Мэв.

Дальнейший анализ состава частиц и оценка энергии их, проведенная, в основном, путем определения плотности зерен и сравнения ее с кривыми зависимости плотности зерен от энергии протонов и α-частиц в эмульсии G-5, дали следующие результаты:

Энергия в Мэв	25	25	25
Число частиц	51	5	20

Распределение числа частиц по энергиям для случаев, оценка энергии которых могла быть произведена, дано на рис. 2. В области малых энергий кривая проведена пунктиром — этим мы отмечаем, что здесь зависи-

* Работа выполнена в первой половине 1953 г. (см. Отчет РИАН за август 1953 г.).

мость дана в грубом приближении из-за невозможности в чувствительной эмульсии разделения сильно ионизующих частиц по их природе. Все частицы с энергиями больше 80 Мэв отнесены в графике на интервал энергии 80—90 Мэв. Из гистограммы следует, что около 65% всех вылетающих частиц имеют энергию больше 25 Мэв.

Распределение легких заряженных частиц, вылетающих при делении, по пространственным углам относительно падающего протона представлено на рис. 3. Сплошная кривая построена для всех частиц, независимо от них энергии, пунктирная — для частиц, с энер-

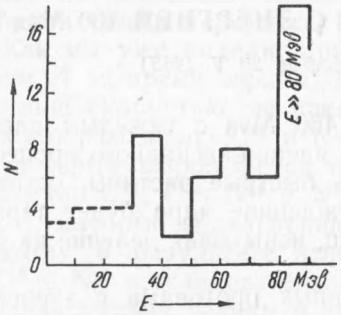


Рис. 2. Распределение по энергиям частиц, вылетающих при делении (эмульсия G-5). $N=60$

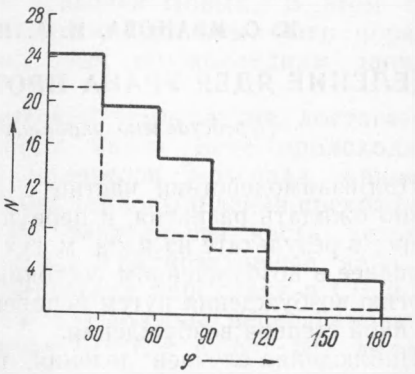


Рис. 3. Угловое распределение частиц, вылетающих при делении

гиями $E > 30$ Мэв. Для первой кривой число частиц, вылетающих вперед (передняя полусфера), в 3,3 раза больше числа частиц, идущих назад (задняя полусфера); для второй кривой это отношение равняется 4,8.

Из сопоставления энергетического спектра легких заряженных частиц и их углового распределения может быть сделан вывод, что большая часть этих частиц возникает в результате ядерно-каскадного процесса, вызванного первичным протоном с $E = 460$ Мэв в ядре урана. Частицы с энергиями меньше 25 Мэв составляют около 35% всех вылетающих частиц *. К ним относятся частицы испарения и некоторая доля частиц выбивания с малыми энергиями.

Верхний и нижний пределы среднего значения энергии возбуждения, полученной ядром урана после испускания ядерно-каскадных частиц, могут быть грубо оценены из наших данных.

Минимальное среднее значение может быть выведено из измерений углов между осколками. В 41,8% всех случаев деления осколки не разлетаются точно в противоположных направлениях, а составляют небольшой угол к этому направлению, обусловленный движением распадающегося ядра урана. Вычисляя для каждого случая деления с углами между осколками скорость ядра урана ([1]) и считая, что события, когда мы не можем измерить углы осколками, относятся к случаям с нулевой скоростью ядра, получим минимальное среднее значение скорости $\bar{v}_{\min} = 0{,}308 \cdot 10^8$ см/сек, что соответствует среднему минимальному значению энергии возбуждения $\bar{E}_{\text{возб}} = 150$ Мэв $- E_{\text{связи}}$. Отсюда, считая, что в каждом процессе вылетают 3,2 частицы, получим значение $\bar{E}_{\text{возб}} = 128$ Мэв.

Верхний предел энергии возбуждения может быть получен, если известно среднее число частиц выбивания и минимальное среднее значение энергии, уносимой каждой частицей. Из наших данных может быть получено лишь минимальное среднее значение энергии, уносимой заряженными частицами (равное 75 Мэв), так как все значе-

* Более поздние результаты дают значение ~ 40—47%.

К статье Н. С. Ивановой и др., стр... 573

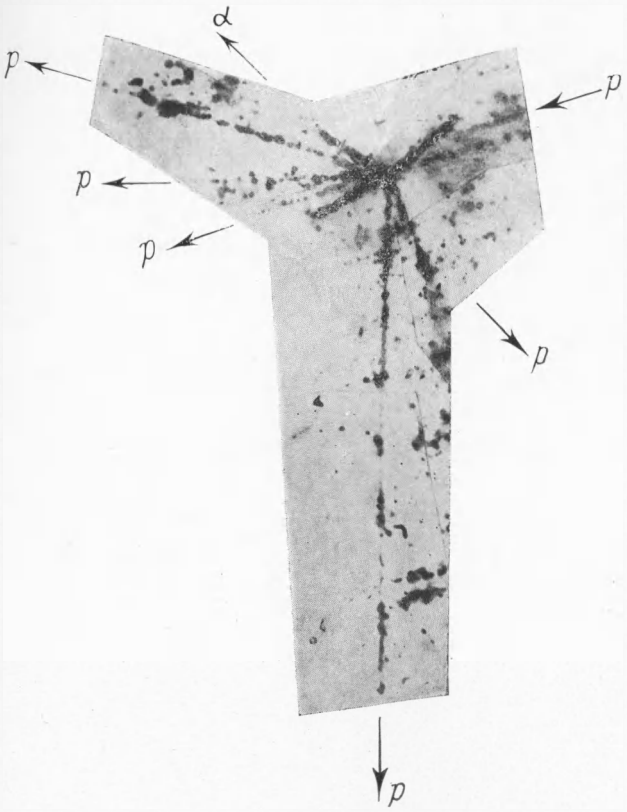


Рис. 1
К статье В. Е. Руженцева, стр... 701

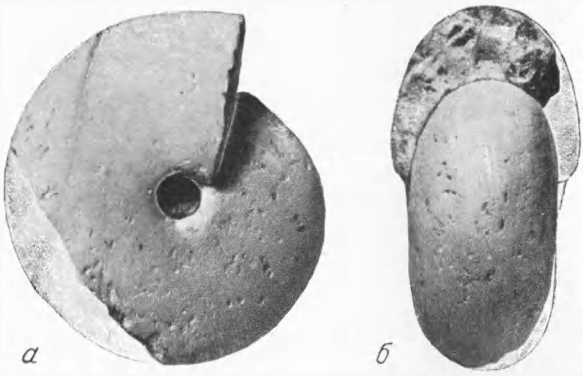


Рис. 2. Timorites sigillarius Ruzhenbev, sp. nov. (×0,5); верхняя пермь Дальнего Востока.
а — вид сбоку, *б* — вентральный вид

ния энергии для частиц с энергиями >100 Мэв принимались равными 100 Мэв. Для нейтронов значение для средней энергии принимаем также равным 75 Мэв.

При оценке числа нейтронов выбивания мы считаем, что оно находится к наблюденному числу ядерно-каскадных протонов в таком же соотношении, в каком они находятся в ядре урана. Тогда получим, что каждое деление сопровождается вылетом 3,2 частиц выбивания с минимальным средним значением энергии 75—80 Мэв, и соответствующий верхний предел среднего значения энергии возбуждения будет равен: $\bar{E}_{\text{возб}} = 220$ Мэв $- E_{\text{связи}} = 198$ Мэв, т. е. 128 Мэв$<$ $<\bar{E}_{\text{возб}}<198$ Мэв.

Вероятность деления урана при взаимодействии этих ядер с протонами энергией 460 Мэв может быть оценена, если известно эффективное сечение для деления урана на протонах данной энергии. Последнее может быть определено, если известен поток первичных протонов, число введенных в единицу объема эмульсии ядер урана и соответствующее наблюденное число делений.

Все эти значения могли быть определены нами в электронно-чувствительной эмульсии, так как поток в этом случае определяется непосредственно путем подсчета числа первичных протонов на пластинках, в которых наблюдались случаи деления. Число введенных ядер урана определялось по числу распадов (α-частиц) за промежуток времени от момента наполнения до момента проявления.

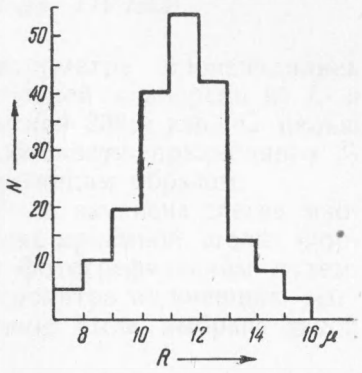


Рис. 4. Распределение одиночных осколков по пробегам

Определение сечения было сделано для двух различных опытов, отличавшихся экспозициями и числом введенных ядер урана. Из наших данных для поперечника сечений деления получилось значение $(1{,}2 \pm 0{,}3) \cdot 10^{-24}$ см^2. Отсюда, если считать полное сечение взаимодействия протонов с E $=$ 460 Мэв равным $\sim 1{,}60 \cdot 10^{-24}$ см^2, то можно сделать заключение, что $\sim 70 \pm 18\%$ всех ядер урана должно испытывать деления при взаимодействии с протонами энергии 460 Мэв.

Из наших данных может быть получена еще одна весьма существенная характеристика деления, вытекающая из распределения числа одиночных осколков по пробегам. На рис. 4 приведена эта зависимость. Данные для построения этой кривой получены из наблюдений как в эмульсии G-5, так и в эмульсии НИКФИ, поскольку точка деления хорошо устанавливается в обеих эмульсиях по входящему первичному протону в эмульсии G-5 и по месту испускания легких заряженных частиц в эмульсии НИКФИ. Кривая рис. 4 имеет один резко выраженный максимум, что указывает на значительный процент симметричных делений ядер урана в случае деления протонами с энергией 460 Мэв.

Средний суммарный пробег осколков в нашем случае равен 23,3 μ что в пределах ошибки совпадает со средним суммарным пробегом (в такой же эмульсии) для деления π-мезонами (23,7 μ) и с соответствующим значением при делении медленными нейтронами (24 μ). Это показывает, как и следовало ожидать, что средняя кинетическая энергия осколков деления получается лишь за счет кулоновского отталкивания этих осколков.

Радиевый институт им. В. Г. Хлопина
Академии наук СССР

Поступило
10 V 1955

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] В. И. Остроумов, ДАН, **103**, № 3 (1955).