

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР Cu, Br, Ag, Sn и Ba

Реакции деления ядер были описаны до последнего времени лишь для тяжёлых элементов с $Z \geq 73$ (т. е. до тантала включительно). Недавно удалось впервые наблюдать ^{*)} реакции, в которых, повидимому, происходит деление и ядер более лёгких элементов: меди, брома, серебра, олова и бария.

Расщепление ядер этих элементов производилось протонами высоких энергий от 184-дюймового фазотрона. Мишенями в случае Cu, Ag и Sn служили листочки фольги толщиной от 0,13 и до 0,25 мм. Бром и барий облучались в виде специально приготовленных исключительно чистых порошков бромистого аммония и углекислого бария. Определённые конечных ядер — продуктов реакции — производилось по их радиоактивности.

1. Мишень Cu. При бомбардировке меди протонами высоких энергий возможны прежде всего две реакции с образованием радиоактивного $^{63}_{29}\text{Cu}$: $^{63}_{29}\text{Cu} + p \rightarrow ^{63}_{29}\text{Cu} + \alpha$ и $^{63}_{29}\text{Cu} + p \rightarrow ^{63}_{29}\text{Cu} + n$. Первая из них — обычная реакция раскалывания ядра под действием частиц высоких энергий, а вторая — реакция деления. Далее, возможны две реакции с образованием радиоактивного $^{24}_{11}\text{Na}$: $^{63}_{29}\text{Cu} + p \rightarrow ^{24}_{11}\text{Na} + \alpha$ и $^{63}_{29}\text{Cu} + p \rightarrow ^{24}_{11}\text{Na} + K$. Вторая из них — также реакция деления. Авторы вычислили нижние границы для энергии бомбардирующих протонов, при которой ещё идут перечисленные реакции, и сопоставили их с экспериментальными кривыми зависимости сечений реакций от энергии протонов.

Таким путём удалось установить, какие наблюдаются реакции и при каких энергиях. При вычислении нижней границы энергий учитывались, во-первых, разница между массами исходных и конечных продуктов реакций и, во-вторых, энергия, необходимая вылетающим частицам для преодоления потенциального барьера ядра. Таким путём вычислены следующие значения порога энергии протонов:

$^{63}_{29}\text{Cu} + p \rightarrow ^{63}_{29}\text{Cu} + \alpha$. . . 110 Мэв $^{63}_{29}\text{Cu} + p \rightarrow ^{63}_{29}\text{Cu} + \alpha + n$. . . около 50 Мэв
 $^{63}_{29}\text{Cu} + p \rightarrow ^{24}_{11}\text{Na} + \alpha$. . . 170 Мэв $^{63}_{29}\text{Cu} + p \rightarrow ^{24}_{11}\text{Na} + K + n$. . . 50 Мэв

На рис. 1 показаны экспериментальные кривые зависимости сечений реакций с образованием $^{63}_{29}\text{Cu}$ и $^{24}_{11}\text{Na}$ от энергии протонов. Как видно из этих кривых, $^{63}_{29}\text{Cu}$ получается уже при энергиях протонов около 70 Мэв, т. е. значительно меньших, чем этого требует реакция $^{63}_{29}\text{Cu} + p \rightarrow ^{63}_{29}\text{Cu} + \alpha$, и, наоборот, близких к минимальной энергии протонов в реакции деления $^{63}_{29}\text{Cu}$ на $^{63}_{29}\text{Cu}$ и α . Такая же картина наблю-

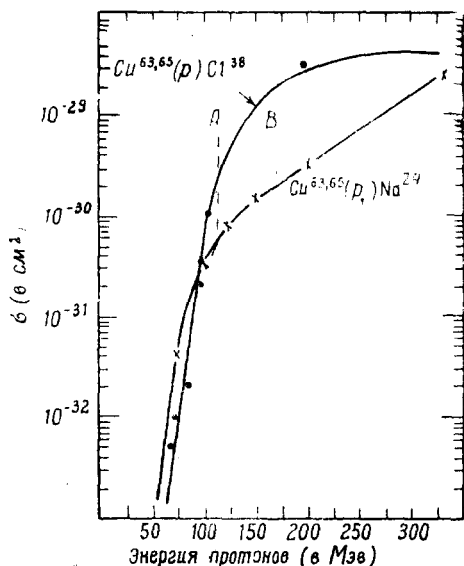


Рис. 1.

^{*)} R. E. Batzel and G. T. Seaborg, Phys. Rev. 82, 607 (1951).

дается и при образовании Na^{24} . Отсюда авторы делают вывод, что в данных опытах, особенно при относительно малых энергиях протонов, действительно наблюдаются реакции деления ядер меди.

Аналогичный теоретический расчёт порогов реакций и сравнение с экспериментом были проведены и для всех остальных мишеней (Br , Ag , Sn и Ba). Были получены следующие результаты.

2. Бром. Теоретическое значение порога для реакции $\text{Br}^{79}(\text{p}, \text{p}7\text{n}-7\alpha)\text{Sc}^{44}$ около 190 Мэв, для реакции деления $\text{Br}^{79} + \text{p} \rightarrow \text{P}^{34} +$

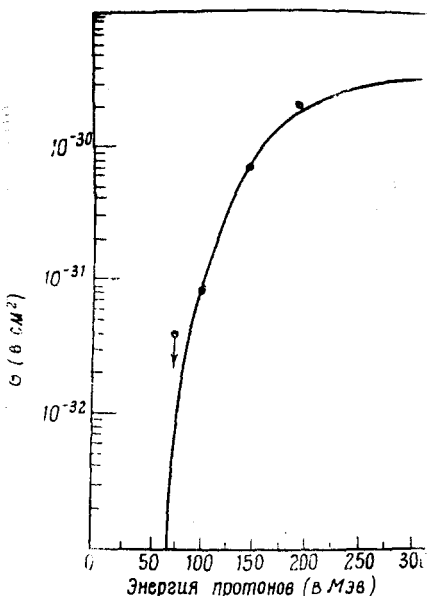


Рис. 2.

$+ \text{Sc}^{44} + 2\text{p}$ — около 80 Мэв. Опыт даёт для порога реакции величину, несколько большую 100 Мэв, т. е. реакция деления действительно имеет место. При 125 Мэв сечение для образования радиоактивного скандия Sc^{44} может быть уже измерено, оно порядка 10^{-32} см^2 .

3. Серебро. Для реакции $\text{Ag}^{107}(\text{p}, \text{p}6\text{n}10\alpha)\text{Co}^{61}$ порог составляет около 210 Мэв, а для деления ядер серебра на кобальт и скандий $\text{Ag}^{107} + \text{p} \rightarrow \text{Co}^{61} + \text{Sc}^{45} + 2\text{p}$, соответственно, 60 Мэв. Однако опыты с Ag менее надёжны, чем с другими элементами. Дело в том, что в серебре обычно встречается примесь меди; спектральный анализ вещества мишени указал на примесь 0,001% меди. Сечение для образования радиоактивного Co^{61} из Ag^{107} очень мало; для протонов в 180 Мэв оно составляет лишь 10^{-32} см^2 . Для образования Co^{61} из меди сечение значительно больше,

и поэтому ничтожная примесь 0,001% меди даёт при 180 Мэв столько же Co^{61} , сколько и всё остальное вещество мишени.

4. Олово. Для реакции распада ядер олова с выделением α -частиц и образованием Na^{24} теоретический порог — около 425 Мэв, для реакции $\text{Sn}^{118} + \text{p} \rightarrow \text{Na}^{24} + \text{Zr}^{94} + \text{p} - 50 \text{ Мэв}$. Результаты эксперимента приведены на рис. 2; изображённая на рис. 2 экспериментальная кривая характеризует собой именно реакцию деления.

Олово может распадаться и по другой схеме — с образованием радиоактивных изотопов Ga^{66} и Ga^{73} . Природное олово — смесь нескольких нерадиоактивных изотопов с массовыми числами от 115 и до 125. Ниже приведены результаты расчёта порога реакций для Sn^{118} ; для остальных изотопов олова разница составит лишь несколько Мэв и на выводы из экспериментов не повлияет. Пороги энергии протонов для образования из олова галлия равны:

$\text{Sn}^{118}(\text{p}, 7\text{n}10\alpha)\text{Ga}^{73}$	230 Мэв
$\text{Sn}^{118}(\text{p}, 13\text{n}10\alpha)\text{Ga}^{66}$	280 Мэв
$\text{Sn}^{118} + \text{p} \rightarrow \text{Ga}^{73} + \text{Ca}^{45} + 2\text{p}$	70 Мэв
$\text{Sn}^{118} + \text{p} \rightarrow \text{Ga}^{66} + \text{Ca}^{48} + 4\text{n}$	90 Мэв

Результаты опыта: при энергии протонов 80 *Мэв* галлия не обнаружено совсем, при 100 *Мэв* обнаружены следы радиоактивного галлия, при 150 и 180 *Мэв* галлия уже достаточно для его количественного определения; сечение реакции при этих энергиях — около 10^{-32} см².

5. Барий. Теоретический порог для Ba^{137} (p , 20n 13 α) Ga^{66} — 370 *Мэв*, для $\text{Ba}^{137} + p \rightarrow \text{Ga}^{66} + \text{Fe}^{60} + 12n$, соответственно, 150 *Мэв*. Опыт показывает, что оба радиоактивных изотона Ga^{66} и Ga^{73} образуются уже при бомбардировке Ba^{137} протонами с энергией 335 *Мэв* (сечение реакции 10^{-31} см²).

Понижение порога энергий бомбардирующих частиц против его теоретического значения могло бы быть вызвано не только реакцией деления, но и распадом при бомбардировке ядер различных примесей. Поэтому во всех случаях был проведён тщательный анализ содержания примесей и их возможной роли, и на основании этого анализа авторы заключают, что наблюдавшиеся ими весьма низкие пороги реакций посторонними примесями объяснены быть не могут и со всей определённоностью указывают на существование реакций деления.

В качестве вывода из своей работы авторы высказывают мнение, что при соответствующих энергиях возбуждения реакции деления происходят в ядрах всех элементов.

М. Гинцбург

ЭФФЕКТИВНЫЕ ЯДЕРНЫЕ СЕЧЕНИЯ ДЛЯ НЕЙТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

За последние годы появился ряд работ, посвящённых определению эффективных ядерных сечений для нейтронов высоких энергий.

Источником нейтронов высоких энергий служили две реакции — расщепление дейтронов при бомбардировке различных мишеней и обменное взаимодействие протонов с нейтронами в ядрах бомбардируемых мишеней.

В первой из указанных реакций возникают нейтроны со средней энергией, равной половине энергии дейтронов. Во второй реакции возникают нейтроны с весьма широким энергетическим спектром, максимум которого лежит несколько ниже энергии исходных протонов.

Согласно теории¹ полные эффективные ядерные сечения для нейтронов высоких энергий складываются из сечений упругого (дифракционного) рассеяния σ_d и сечений неупругих столкновений σ_a , причём при относительно малых энергиях $\sigma_a = \sigma_d = \pi R^2$ и полное сечение $\sigma_t = 2\pi R^2$, где R — радиус ядра. На основании опытов по определению полных сечений для нейтронов с энергией 14 — 25 *Мэв* было выведено² прибли-

жённое соотношение $R = \left(1,3 + 1,37 A^{\frac{1}{3}}\right) \cdot 10^{-13}$ см. Энергетическая