

Ф-716

2200/2-76

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



14/VI-76

Д7 - 9555

Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, А.А.Плеве,
Н.В.Пронин, Ю.П.Третьяков

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ КАЛЬЦИЯ-48
И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИНТЕЗА
СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

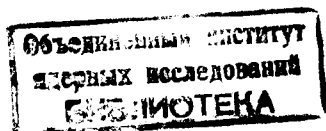
1976

Д7 - 9555

Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, А.А.Плеве,
Н.В.Пронин, Ю.П.Третьяков

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ КАЛЬЦИЯ-48
И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИНТЕЗА
СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Направлено в "Nuclear Physics"



В мировой научной печати уже долгое время обсуждаются исключительные возможности, которые могут дать ускоренные ионы ^{48}Ca для осуществления реакций синтеза сверхтяжелых элементов и проверки гипотезы об их существовании^{1,2,3}.

Как известно, устойчивость и само существование сверхтяжелых ядер вблизи $Z = 114$, $N = 184$ ^{4,5,6} полностью определяются оболочечными эффектами, которые весьма чувствительны к составу ядра и к энергии возбуждения. Поэтому единственный путь синтеза сверхтяжелых ядер - реакции с тяжелыми ионами - наталкивается на две трудности.

Как правило, энергии возбуждения составных ядер исчисляются десятками мегаэлектронвольт. При таких возбуждениях стабилизирующий эффект оболочек может быть сильно подавлен⁷. Вследствие того, что жидкокапельный барьер деления у сверхтяжелых ядер отсутствует, это приведет к резкому возрастанию вероятности деления и соответствующему уменьшению сечений реакций типа /ион, xp /.

Вторая трудность связана со свойствами сверхтяжелых ядер в основном состоянии. В реакциях с тяжелыми ионами, как правило, образуются нейтронодефицитные ядра. В то же время, как следует из расчетов⁸, отход от замкнутых оболочек $N=184$, $Z=114$ резко уменьшает устойчивость ядер, что может сказаться катастрофически как на временах жизни синтезируемых ядер, так и на сечениях реакций синтеза.

Если оставить в стороне вопрос о существовании самих сверхтяжелых элементов, то весьма вероятно, что именно эти особенности реакций синтеза приводили к тому, что до сих пор попытки синтезировать сверхтяжелые ядра в реакциях слияния не дали положительных результатов^{9,10,11}.

Исключительный нейтронный избыток ядра ^{48}Ca позволяет свести до минимума нейтронный дефицит синтезируемых ядер по сравнению с реакциями на других ионах и при синтезе сверхтяжелых ядер $Z \sim 114$ максимально приблизиться к замкнутой нейтронной оболочке $N=184$.

С другой стороны, простой расчет показывает, что энергия возбуждения составного ядра $^{292}114$, которое образуется в реакции $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$, составляет всего 18 МэВ при $E_{\text{ион}} = V_c$ /высота кулоновского барьера/. Наиболее вероятная при этом реакция ($^{48}\text{Ca}, 2n$) будет приводить к образованию изотопа $^{290}114$, удаленного от дважды магического ядра $^{298}114$ всего на 8 нейтронов.

Несмотря на столь очевидные достоинства, ионы ^{48}Ca до сих пор нигде не ускорялись. Причина этого состоит в том, что содержание ^{48}Ca в естественной смеси изотопов кальция очень мало /0,18%/, а выделение его задача весьма сложная и дорогостоящая. Мировые запасы обогащенного изотопа ^{48}Ca составляют, по-видимому, всего несколько десятков граммов. Кроме того, кальций как химический элемент не имеет подходящих газообразных соединений, поэтому его нельзя использовать в ионных источниках обычного типа с рабочим веществом в виде газа.

Ниже описываются опыты по ускорению ионов ^{48}Ca и модельные эксперименты с ними по синтезу изотопа $^{252}102$.

Для ускорения ионов ^{48}Ca был разработан новый тип источника многозарядных ионов с рабочим веществом в твердом состоянии /12/. В отличие от источника с подачей рабочего вещества в виде газа, новый источник имеет в разрядной камере дополнительный электрод, содержащий рабочее вещество. Электрод укреплен на подвижном изолированном держателе, охлаждаемом водой, и расположен вблизи эмиссионной щели камеры /рис.1/. Положение электрода и подаваемый на него потенциал плавно регулируются для выбора оптимального режима работы.

Для изготовления электродов была разработана специальная технология, обеспечивающая механическую и термическую прочность при использовании рабочего вещества в виде металлов, окислов, солей и т.д. При работе

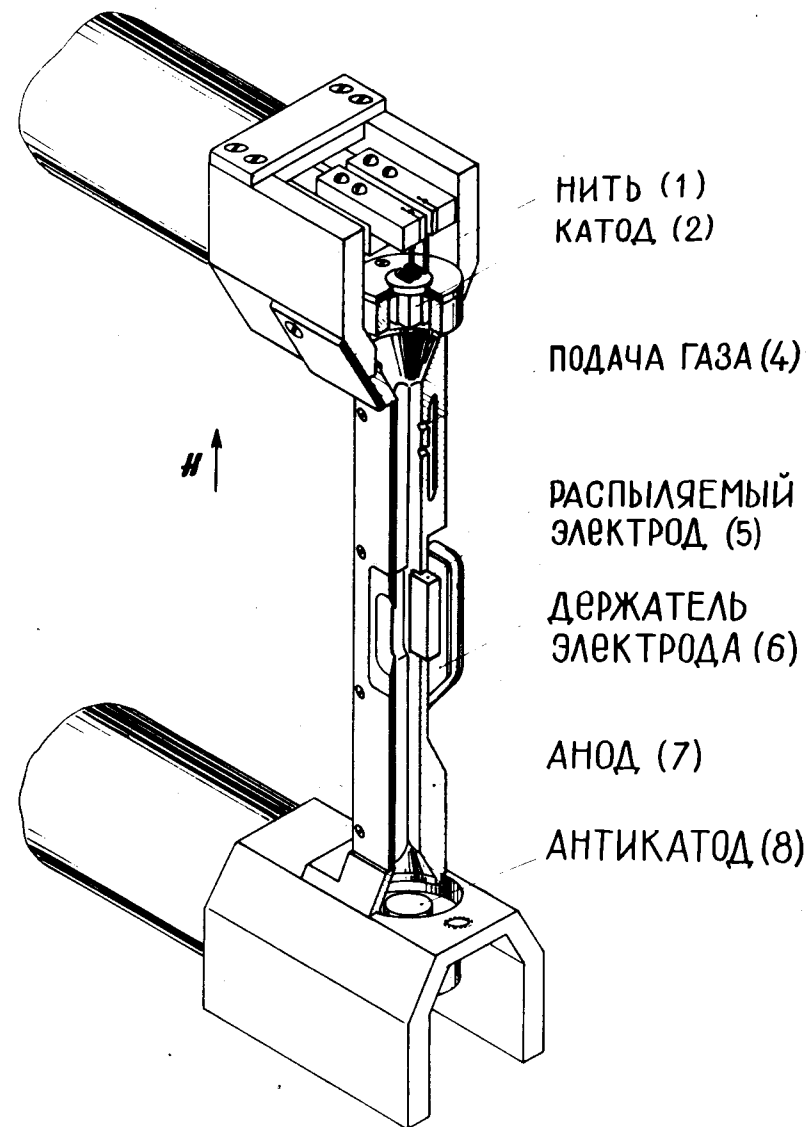


Рис. 1. Схема источника многозарядных ионов кальция.

с кальцием, естественным и обогащенным изотопом 48, использовались как металлический кальций, так и в виде CaF_2 .

Для циклотрона У-300 энергия ионов на конечном радиусе дается соотношением: $E = 250Z^2/A \text{ МэВ}$, где Z - заряд иона, A - массовое число. Оценки показывают, что для достижения энергии, необходимой для осуществления реакций на мишенях U, Рнужно было получить в ионном источнике и далее ускорить ионы ^{48}Ca с зарядностью не ниже 7+. Задача усложнялась тем, что ионы столь высокой зарядности должны быть получены при минимальном расходе рабочего вещества. Это было достигнуто тщательной отработкой конструкции и режимов работы ионного источника и циклотрона У-300, специальной технологией изготовления электродов и последующей регенерацией ~60% исходного вещества, оседающего на стенках разрядной камеры источника. В результате этих усовершенствований на конечном радиусе циклотрона был получен пучок ионов $^{48}\text{Ca}^{7+}$ с энергией 255 МэВ и интенсивностью $1,7 \cdot 10^{12}$ част/с при расходе изотопа 4 мг/час / $\sim 1,3 \cdot 10^{16}$ атомов/с/.

Первые опыты с пучком ионов ^{48}Ca имели целью проверить экспериментально их исключительные достоинства для целей синтеза, о которых говорилось выше. В качестве модельного эксперимента мы выбрали реакции $\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, \text{xn})^{252}102$. Изотоп 102 элемента, который здесь образуется, имеет период полураспада 2,3 с и в 30% случаев испытывает спонтанное деление. В качестве мишеней использовались разделенные изотопы свинца /208, 207, 206, 204/ высокой степени очистки. Минимальные энергии возбуждения составных ядер /при $E_{\text{ион}} = V_c$ / составляют 17-18 МэВ /см. таблицу/, и на основании оценок можно было ожидать, что реакции с испарением малого числа нейтронов будут иметь сравнительно большие сечения.

Идентификация и измерение выхода $^{252}102$ проводилась путем регистрации осколков спонтанного деления продуктов реакций и точного измерения периода полураспада. Схема экспериментальной установки была аналогична опубликованной ранее /13/. Пучок ионов ^{48}Ca падал по касательной на боковую поверхность вращающегося полого цилиндра. На эту поверхность способом вакуум-

ного напыления был нанесен тонкий $\sim 2 \text{ мг/см}^2$ / слой вещества мишени по всей окружности. В такой геометрии мишень являлась "бесконечно" толстой для пучка ионов и ядер отдачи и в то же время достаточно тонкой для эффективной регистрации осколков спонтанного деления продуктов реакций. Поверхность цилиндра, таким образом, служила одновременно мишенью и сборником ядер отдачи. Вращение переносило ядра к слюдяным трековым детекторам осколков, расположенным вдоль поверхности цилиндра, и задавало временную шкалу для определения периодов полураспада. Детекторы были надежно защищены от фона рассеянных ионов. Эффективность регистрации актов спонтанного деления составляла ~50%.

Интенсивность пучка ионов во время эксперимента контролировалась специальным устройством, расположенным вне мишени. Интегральный поток ионов определялся активационным методом по накоплению долгоживущей активности в образце Al, занимающем малую часть рабочей поверхности вращающегося цилиндра.

Энергия падающих на мишень ионов ^{48}Ca во всех облучениях составляла 235 МэВ. В таблице приведены также значения минимальных энергий возбуждения составных ядер, соответствующие $E_{\text{ион}} = V_c$, и результаты измерений. Числа треков отражают полное количество актов деления, зарегистрированных в реакции, при продолжительности облучений ~1 ч.

Таблица

| Реакция | $E_{\text{ион}}$ МэВ | $E_{\text{возб}}^{(\text{мин})}$ МэВ | Число треков |
|---|-------------------------|---|-----------------|
| $^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 4\text{n})^{252}102$ | 235 | ~17 | 30 |
| $^{207}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 3\text{n})^{252}102$ | 235 | ~18 | 59 |
| $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2\text{n})^{252}102$ | 235 | ~18 | 438 |
| $^{204}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, \gamma)^{252}102$ | 235 | ~18 | 3 |

На рис. 2 показано временное распределение осколков деления $^{252}_{102}$. Видно, что измеренное значение периода полураспада $T_{1/2}$ с/ в точности совпадает с известной величиной $T_{1/2}^{14}$.

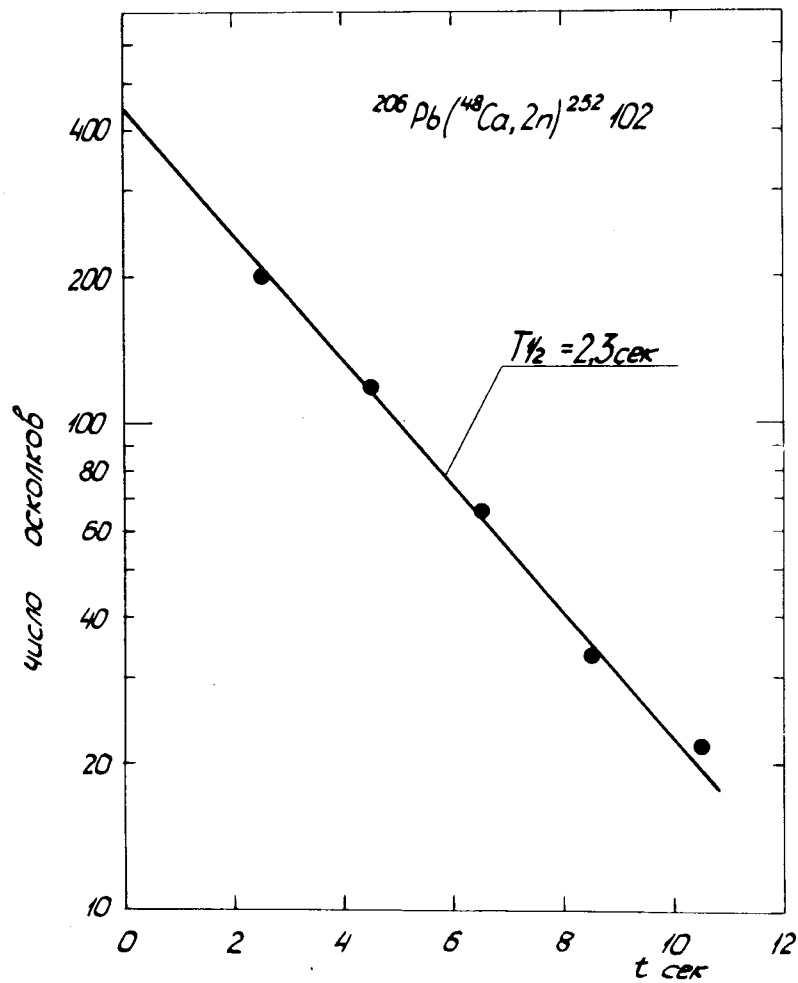


Рис. 2. Временное распределение осколков деления изотопа $^{252}_{102}$.

На рис. 3 экспериментальные значения сечений для реакций с вылетом 2, 3, 4 нейтронов сравниваются с расчетными данными. Методика расчета сечений для реакций

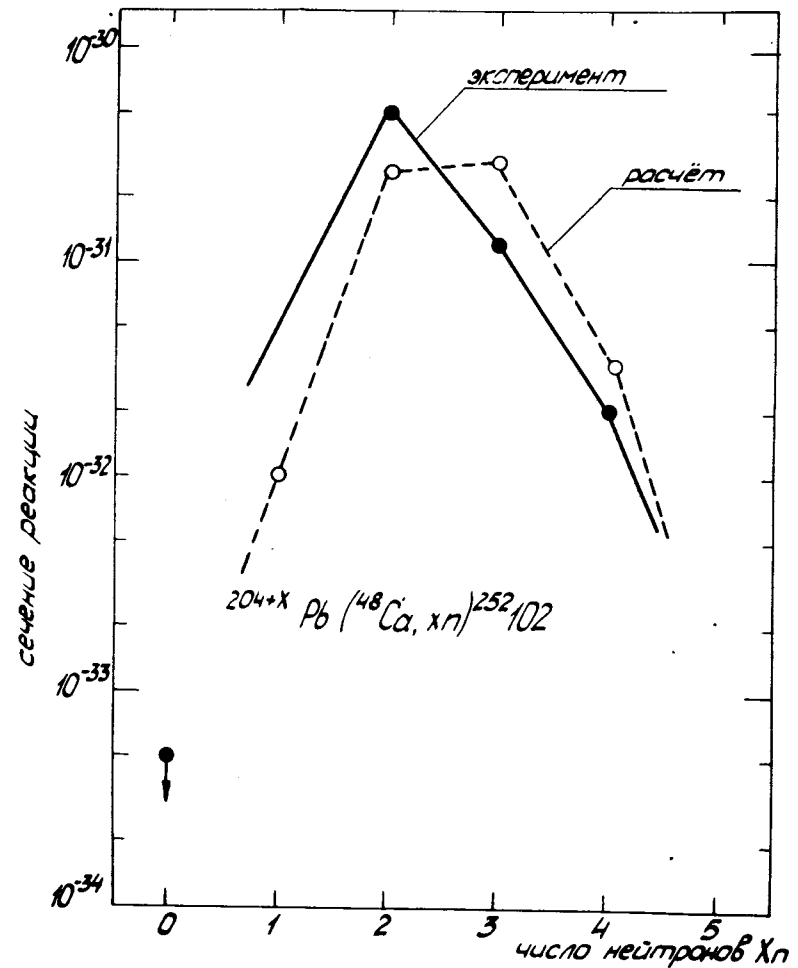


Рис. 3. Сечения образования изотопа $^{252}_{102}$ в реакциях с ионами $^{48}_{20}\text{Ca}$.

с вылетом малого числа нейтронов $^{15/}$ содержит несколько параметров. В данном случае значения параметров были выбраны с учетом результатов, полученных в экспериментах с ионами Ar , Ti , Cr $^{16,17/}$.

Наиболее важный результат этих опытов - установление того факта, что при использовании ионов $^{48}_{20}\text{Ca}$ абсолютные сечения реакций синтеза 102 элемента срав-

нительно велики, причем наибольшую величину имеет сечение реакции с вылетом 2 нейтронов: приблизительно $5 \cdot 10^{-31} \text{ см}^2$. Эта величина примерно в 40 раз превосходит сечения реакций с ионами ^{18}O и ^{22}Ne , приводящих к тому же продукту ^{18}F .

В последующих опытах мы попытались определить вероятность радиационного захвата ^{48}Ca . Не изменяя методики эксперимента, мы выбрали для этой цели реакцию $^{204}\text{Pb} (^{48}\text{Ca}, \gamma) ^{252}\text{102}$. В качестве мишени использовался изотоп ^{204}Pb с обогащением 99,80%.

Зарегистрированные в этом эксперименте 3 осколка спонтанного деления могут быть полностью отнесены к реакции $^{206}\text{Pb} (^{48}\text{Ca}, 2n) ^{252}\text{102}$ на примеси ^{206}Pb в материале мишени. Это определяет верхнюю границу сечения реакции $^{208}\text{Pb} (^{48}\text{Ca}, \gamma)$ на уровне $\sim 5 \cdot 10^{-31} \text{ см}^2$, т.е. в 1000 раз ниже сечения реакции с испусканием 2 нейтронов.

Вопрос о сечениях реакций радиационного захвата тяжелых ионов представляет самостоятельный интерес с точки зрения конкуренции между испусканием нейтронов и γ -лучей в области сильно делящихся ядер. В дальнейшем мы намерены провести подобные эксперименты с более высокой чувствительностью.

Результаты опытов с ускоренными ионами ^{48}Ca , на наш взгляд, приводят к выводу о том, что использование этих ионов действительно дает уникальные возможности для синтеза новых трансурановых и сверхтяжелых элементов. При этом, конечно, следует иметь в виду, что переход от изотопов свинца к ядрам U, Pu или Cm приведет к некоторому увеличению минимальных энергий возбуждения составных ядер, однако по нашим оценкам они не будут превышать 20-25 МэВ. При таких энергиях возбуждения не исключено, что в определенной доле случаев составные ядра будут переходить в основное состояние с испусканием малого числа нейтронов. С другой стороны, при интенсивности пучка ионов $\sim 10^{12} \text{ част/с}$ можно зарегистрировать образование сверхтяжелых ядер, если сечение реакций синтеза составит 10^{-31} и даже 10^{-35} см^2 .

Авторы весьма признательны Государственному комитету по использованию атомной энергии за предоставленный в наше распоряжение обогащенных изотоп ^{48}Ca .

Мы признательны сотрудникам Госфонда стабильных изотопов за переработку кальция; П.М.Морозову, Р.Н.Кузьмину и их сотрудникам за очистку изотопа ^{204}Pb ; С.П.Третьяковой, В.М.Плотко мы благодарны за помощь в проведении экспериментов и обработке результатов, Г.М.Соловьевой - за помощь в работе по усовершенствованию ионного источника. Коллективу эксплуатации циклотрона У-300, руководимому Б.Н.Марковым, мы благодарны за обеспечение максимально эффективной работы ускорителя во время ускорения ионов кальция.

Литература

1. G.N.Flerov. Preprint JINR. E7-4207, Dubna, 1968; *Future of Nuclear Structure Studies*, p. 11, Vienna IAEA (1969); 26, 138 (1969).
2. W.J.Swiatecki, C.F.Tsang. *Annual Report LBL-666*, p. 138, 1971.
3. J.R.Nix. *Proceedings of the International Conference on Nuclear Physics, Munich, 1973*, v. 2, p. 361.
4. В.М.Струтинский. *Препринт ИАЭ - 1108*, Москва, 1966.
5. W.D.Myers and W.J.Swiatecki. *Nucl.Phys.*, 81, 1 (1966).
6. Ю.А.Музыка, В.В.Пашкевич, В.М.Струтинский. *ЯФ*, 8, 716 /1968/.
7. L.G.Moretto. *Nucl.Phys.*, A180, 337 (1972).
8. E.O.Fiset and J.R.Nix. *Nucl.Phys.*, A193, 647(1972).
9. S.G.Nilsson, S.G.Thompson, C.F.Tsang. *Phys.Lett.*, 28B, 458 (1969).
10. Г.Н.Флеров и др. *Препринт ОИЯИ, P7-7409*, Дубна, 1973; *ЯФ*, 19, 492 /1974/.
11. R.Vimbot et al. *Nature*, 234, 215 (1971).
12. Ю.П.Третьяков, А.С.Пасюк. *Аннотации докладов на IV Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц*, Москва, 18-20 ноября 1974 г., стр. 61; Москва, 1974.
13. Ю.Ц.Оганесян и др. *Препринт ОИЯИ, Д7-8224*, Дубна, 1974; *Nucl.Phys.*, A239, 157 (1975).
14. В.Л.Мухеев и др. *АЭ*, 22, 90 /1967/.
15. А.С.Ильинов. *Сообщение ОИЯИ, P7-7108*, Дубна, 1973.
16. Yu.Ts.Oganessian et al. *Nucl.Phys.*, A239, 353(1975).
17. G.M.Ter-Akopian et al. *Nucl.Phys.*, A225, 509(1975).
18. G.N.Flerov et al. *Nucl.Phys.*, A160, 181 (1971).

Рукопись поступила в издательский отдел
20 февраля 1976 года.