

0-361

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



1952/2-74

20/2-24

P7 - 7863

Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич,
К.А.А.Гаврилов, Ким Де Ен

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВ РЕАКЦИЙ
ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ЯДЕР ^{208}Pb И ^{238}U
ИОНАМИ ^{40}Ar И ^{52}Cr

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

P7 - 7863

Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич,
К.А.А.Гаврилов, Ким Де Ен

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВ РЕАКЦИЙ
ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ЯДЕР ^{208}Pb И ^{238}U
ИОНАМИ ^{40}Ar И ^{52}Cr

Направлено в ЯФ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Оганесян Ю.Ц., Пенионжкевич Ю.Э., Гаврилов К.А.,
Ким Де Эн

P7 - 7863

Определение порогов реакций при бомбардировке ядер
 ^{208}Pb и ^{238}U ионами ^{40}Ar и ^{52}Cr

Изучались сечения образования осколков деления на тонких мишенях ^{208}Pb и ^{238}U в зависимости от энергии бомбардирующих ионов ^{40}Ar и ^{52}Cr . С помощью полученных зависимостей определялся кулоновский барьер взаимодействующих ядер и соответствующий ему эффективный радиус взаимодействия, который оказался постоянным для всех исследуемых реакций и составлял $1,44 \pm 0,02$ ферми. Полученные данные сравниваются с результатами различных расчетов.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1974

Oganessyan Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E.,
Gavrilov K.A., Kim De En

P7 - 7863

Determination of Reaction Thresholds in Bombarding
 ^{208}Pb and ^{238}U Nuclei by ^{40}Ar and ^{52}Cr Ions

The cross sections for the formation of fission fragments on thin ^{208}Pb and ^{238}U targets were investigated as a function of the energy of ^{40}Ar and ^{52}Cr incident ions. In the $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$ reaction, the energy dependences of the yield of products from multi-nucleon transfer reactions were also studied. By using the dependences obtained, the Coulomb barrier of interacting nuclei and the corresponding effective radius of the interactions were determined. The latter appeared to be constant for all the reactions studied and equal to 1.44 ± 0.02 fermi. The data obtained are compared with the results of different calculations.

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1974

Процесс взаимодействия двух сложных ядер характеризуется энергетическим порогом взаимодействия этих ядер, а также эффективным радиусом. Известно, что при взаимодействии ионов с $A < 20$ с ядрами в широком диапазоне масс с большой вероятностью происходит реакция слияния этих ядер, соответствующая эффективным радиусам взаимодействия $r_{\text{эфф.}} = 1,45-1,50$ ферми. При этом значении $r_{\text{эфф.}}$ ядерное взаимодействие начинается практически в точке касания двух ядер. Для более тяжелых ионов с $A \geq 40$ процесс слияния может отличаться от того, что имело место с более легкими ионами, т.к. в этом случае величина кулоновского взаимодействия существенно возрастает и в процессе взаимодействия возможны различные эффекты, зависящие не только от кинематики процесса /1/, но и от свойств самих ядер /деформация, вязкость и др. /2,3/. Это должно найти отражение как в вероятности образования составных ядер, так и в энергетических соотношениях, характеризующих процесс столкновения, слияния и девозбуждения составных ядер. Все эти зависимости являются весьма существенными не только для понимания механизма взаимодействия сложных ядер, но и при синтезе тяжелых и сверхтяжелых элементов в реакциях с тяжелыми ионами.

Экспериментальные данные по эффективным радиусам и барьерам взаимодействия для бомбардирующих ионов с $A \geq 40$ весьма ограничены. Ряд экспериментов был проведен в Институте ядерной физики /Орсэ, Франция/,

где исследовались функции возбуждения реакций с образованием составного ядра $^{72}\text{Ge} + ^{84}\text{Kr}$ и $^{116}\text{Cd} + ^{84}\text{Kr}$ /4/, реакций многонуклонных передач /5/, а также упругое рассеяние ионов криптона на различных ядрах /6/. Сравнение полученных данных с результатами исследований на ионах с $A < 20$ показывает, что в реакциях с ионами криптона имеет место повышение кулоновского барьера на величину ~ 50 МэВ, что соответствует $r_{\text{эфф}} = 1,30$ ферми.

Вместе с тем в дальнейших опытах, проведенных по изучению реакции $^{232}\text{Th} + ^{74}\text{Ge}$ было показано, что сечения реакций передачи и деления /образование составного ядра/ имеют различные энергетические зависимости /7/. Кулоновский барьер для реакции деления в этом случае оказался на 30 МэВ выше порога реакций передач. Из анализа этих данных можно предположить, что различного типа взаимодействия характеризуются различными энергетическими зависимостями и пороги реакций могут отличаться друг от друга. Поэтому представляется интересным получение информации о том, каким образом изменяется энергетический порог для различных каналов реакций при переходе от относительно легких бомбардирующих ионов к более тяжелым.

Настоящая работа посвящена измерению энергетических зависимостей сечений деления /образование составных ядер/ и реакций многонуклонных передач при взаимодействии магического ядра ^{208}Pb и деформированного ядра ^{238}U с ускоренными ионами ^{40}Ar и ^{52}Cr .

Экспериментальная методика

Шесть мишеней одинаковой толщины (~ 500 мкг/см²), изготовленных путем вакуумного напыления вещества на алюминиевую подложку толщиной 25 мк, выполняющую роль сборников продуктов реакций, крепились на охлаждаемой водой поверхности цилиндра, вращающейся со скоростью 100 об/мин. Это позволяло в одном опыте облучать сразу несколько мишеней. Облучение проводилось на выведенном пучке ионов циклотрона Лаборатории ядерных

реакций ОИЯИ У-300. Условия облучения представлены в табл. 1.

Энергетическое разрешение пучка составляло $0,5\%$. Энергия пучка для каждой мишени варьировалась с помощью алюминиевых поглотителей. Для определения энергии использовались зависимости пробег-энергия, взятые из работы /8/. Полный поток частиц, бомбардирующих мишень, определялся по мониторинговой реакции: $^{27}\text{Al}(\text{H}^+, -2p - 1n)^{24}\text{Na}$. После облучения каждая мишень вместе с алюминиевым сборником подвергалась радиохимической обработке с целью выделения отдельных элементов - продуктов ядерных реакций /табл. 1/. В случае свинцовых мишеней в качестве осколков деления выделялись легкие редкоземельные элементы. Для урановой мишени в качестве осколков деления радиохимическим методом выделялись изотопы золота. Изотопы ^{237}U и ^{238}Np образовывались в качестве продуктов реакций передачи 1-2 нуклонов при взаимодействии ^{238}U с ^{40}Ar . Измерение их гамма-радиоактивности проводилось сразу же после облучения без радиохимического выделения.

Гамма-активность исследуемых продуктов измерялась на $\text{Ge}(\text{Li})$ - гамма-спектрометре. Эффективность спектрометра составляла $6,5\%$, энергетическое разрешение - 2 кэВ для линии $E_{\gamma} = 250$ кэВ. Идентификация изотопов и определение их выхода осуществлялось путем измерения энергии, периода полураспада и интенсивностей известных гамма-переходов этих изотопов. Относительная погрешность определения выхода отдельных изотопов, таким образом, не превышала $5-7\%$. Сечение образования отдельных изотопов определялось из их относительного выхода с учетом толщины мишени и тока ионов. Погрешность в определении сечения для максимальной энергии не превышала 10% , а для минимальной энергии определялась статистической ошибкой и составляла $30-40\%$. Суммарный энергетический разброс экспериментальных данных определялся немонохроматичностью пучка и неоднородностью поглотителя и составлял $2 - 2,5$ МэВ.

Таблица 1

Бомбардирующий ион	Средняя интенсивность ионов (част/сек)	Максимальная энергия ионов (МэВ)	Ядро мишени	Область исследуемых масс ядер
$^{40}\text{Ar}^{+6}$	$2 \cdot 10^{12}$	225	^{208}Pb	135-155 190-200
$^{40}\text{Ar}^{+7}$	$5 \cdot 10^{11}$	306	^{238}U	190-200 235-239
$^{52}\text{Cr}^{+8}$	10^{10}	307	^{208}Pb	190-200 235-239 135-155 190-200

Экспериментальные результаты

В эксперименте измерялись сечения образования отдельных изотопов. Расчет зависимости сечения деления от энергии бомбардирующих ионов должен быть произведен с учетом массового и зарядового распределения этих осколков. Изотопные распределения осколков деления были измерены нами экспериментально для нескольких значений энергий бомбардирующих ионов в реакциях $^{208}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, f) \text{PЗЭ}$; $^{208}\text{Pb}(^{52}\text{Cr}, f) \text{PЗЭ}$; $^{238}\text{U}(^{40}\text{Ar}, f) \text{PЗЭ}$; $^{193,194,196,198,199}\text{Au}$.

Полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, полученными ранее при изучении зарядовых распределений осколков деления возбужденных ядер с $Z > 100$ ^{9/}. Поправка на массовое распределение осколков рассчитывалась нами на основании известных данных по распределению масс осколков деления в реакциях с тяжелыми ионами^{10/}. Следует отметить, что эта коррекция слабо зависит от энергии ионов. Изменение массовой дисперсии в 1,5 раза приводит к поправке 8-10%. Энергетическая зависимость сечения деления для реакции $^{208}\text{Pb} + ^{40}\text{Ar}$; $^{208}\text{Pb} + ^{52}\text{Cr}$ и $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$ представлены на рис. 1,2. Для определения барьера деления мы воспользовались представлением, предложенным в работе^{11/}. В исследуемом нами диапазоне энергий движение иона вблизи ядра мишени может быть представлено классической траекторией, и поэтому для описания зависимости $\sigma = f(E)$ использу-

ется простое соотношение $\sigma_{\text{с.я.}} = \pi r_{\text{эфф}}^2 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})^2 (1 - \frac{V}{E_b})$.

Как видно из рис. 1, экспериментальные данные хорошо описываются этой зависимостью. Тогда величина кулоновского барьера может быть определена из линейной

экстраполяции $\sigma_{\text{с.я.}} = f(\frac{1}{E_b})$, как это представлено

на рис. 2. Величины кулоновского барьера исследуемых нами реакций приведены в табл. 2. Используя выражение

Таблица 2

Частица	Мишень	В деления (МэВ) (данные настоя- щей работы)	σ эфф (ферми)	σ эфф (ферми) данные работы /12/	Превышение барьера сос- тавного ядра над барьером взаимодейств. (МэВ) (данные работы /13/)
^{40}Ar	^{208}Pb	$157 \pm 1,5$	$1,44 \pm 0,02$	1,38	10
^{40}Ar	^{238}U	$171 \pm 1,5$	$1,44 \pm 0,015$	1,37	12
^{52}Cr	^{208}Pb	$203 \pm 1,5$	$1,44 \pm 0,02$	1,35	18

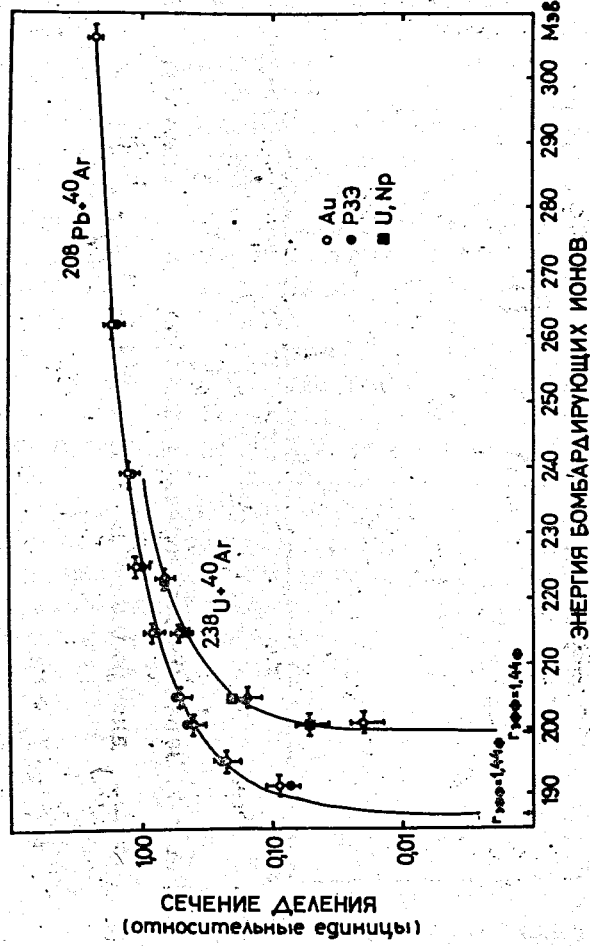


Рис. 1. Энергетическая зависимость сечений реакций деления и передач. Круглые светлые точки соответствуют сечениям, определенным по выходам изотопов золота, образующихся в реакции $^{238}\text{U}(^{40}\text{Ar}, f)\text{Au}$ и $^{238}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, -3p \pm xn)\text{Au}$; круглые зачерненные точки - изотопам редкоземельных элементов /P33/ в реакции $^{208}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, f)\text{P33}$; квадратные точки соответствуют изотопам U и Np, образованным в результате реакции передачи на урановой мишени.

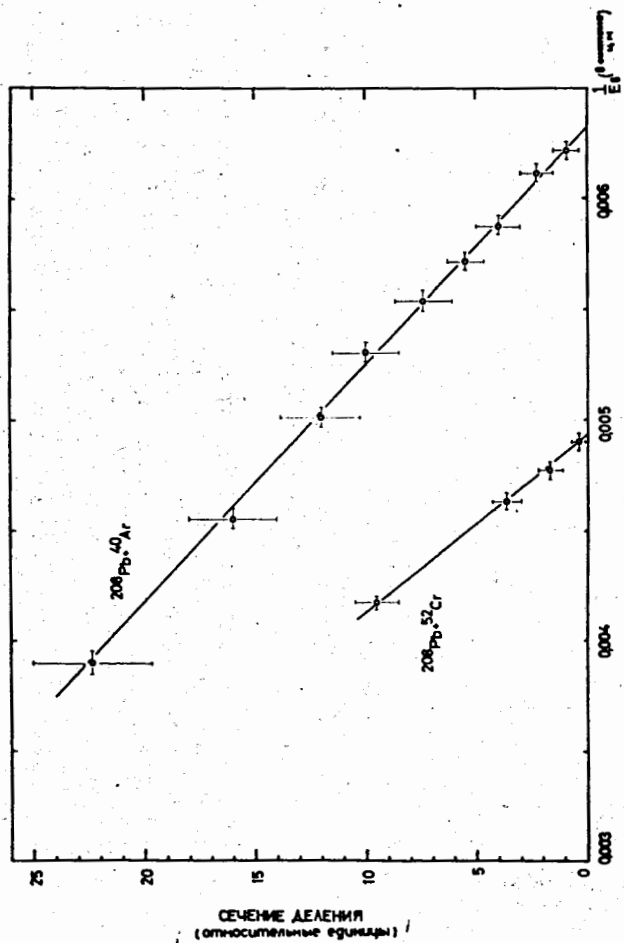


Рис. 2. Зависимость сечения деления от величины $\frac{1}{r_{\text{эфф}}}$ (п.м.) для реакций деления $^{208}\text{Pb}(^{40}\text{Ar}, f)$ РЗЭ и $^{208}\text{Pb}(^{52}\text{Cr}, f)$ РЗЭ.

для кулоновского барьера вида $V_{\text{кул}} = \frac{e^2 Z_1 Z_2}{r_{\text{эфф}}(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})}$, можно определить эффективный радиус взаимодействия, который также представлен в табл. 2.

Представляется интересным сравнение полученных данных с расчетными значениями, полученными в работах /12,13/. Видно, что экспериментальные данные заметно отличаются от того, что предсказывается для значений барьера слияния и эффективного радиуса взаимодействия на основе тех или иных предположений о характере взаимодействия сложных ядер. Так, например, для реакции $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$ согласно расчетам Басса /13/ величина барьера слияния должна на 13 МэВ превышать энергию, соответствующую касанию ядер урана и аргона. Вместе с тем экспериментально наблюдаемая разница между энергетической зависимостью реакций деления и однонуклонных передач ($^{238}\text{U}(^{40}\text{Ar}, -1n)$; $^{237}\text{U}(^{40}\text{Ar}, +1p-1n)$) не превышает 3 МэВ. Значение величины $r_{\text{эфф}}$ составляет 1,43 - 1,45 ферми, что согласуется с измерением, проведенным ранее Сиккеландом в работе /14/. В реакции $^{208}\text{Pb} + ^{40}\text{Ar}$ эффективный радиус взаимодействия также равен 1,44 ферми. Следует отметить, что ^{208}Pb является дважды магическим сферическим ядром, в то время как уран обладает значительной статической деформацией. В расчетах Расмуссена /15/ было показано, что наличие деформации ядра должно привести к увеличению эффективного радиуса взаимодействия. В частности, для реакции $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$ предполагалось понижение величины кулоновского барьера на величину 10-20 МэВ. Вместе с тем, как видно из сравнения данных, полученных на свинце и уране, эффективные радиусы взаимодействия в пределах экспериментальной точности являются постоянными. Переход от ^{40}Ar к более тяжелым бомбардирующим ионам ^{52}Cr также не приводит к существенному изменению характера взаимодействия - различие в значениях величин $r_{\text{эфф}}$ не выходит за рамки экспериментальных ошибок.

На рис. 3 представлены данные по эффективным радиусам взаимодействия настоящей работы, а также

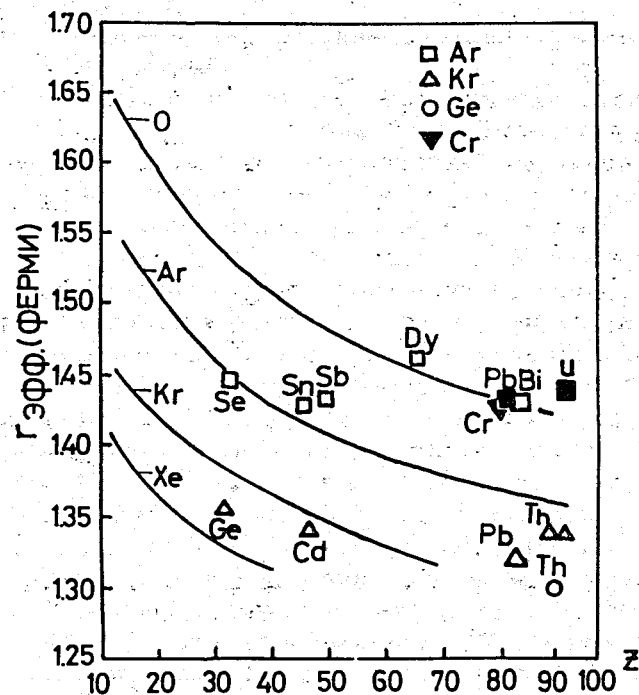


Рис. 3. Зависимость эффективного радиуса взаимодействия от атомного номера Z ядра мишени. Сплошные кривые - данные расчета, взятого из работы /17/. Экспериментальные точки брались из работ /7,16/. Зачерненные точки - данные настоящей работы.

экспериментальные данные, полученные другими авторами в реакциях как с более тяжелыми, так и с более легкими ионами /16/. Здесь же показаны результаты расчета /17/, согласно которому зависимость $r_{\text{эфф}} = f(Z, A)$ подчиняется плавной закономерности, учитывающей нуклонный состав взаимодействующих ядер.

Различие между расчетными и экспериментальными данными по всей вероятности свидетельствует о том, что механизм взаимодействия двух ядер является гораздо более сложным, зависящим не только от кинематических соотношений, но и от других характеристик, описывающих свойства взаимодействующих ядер. Вопрос этот представ-

ляется чрезвычайно важным не только для понимания механизма взаимодействия, но и для получения слабо-возбужденных составных ядер в области тяжелых и сверхтяжелых элементов.

В заключение авторы выражают свою признательность академику Г.Н.Флерову за ценные замечания и внимание к данной работе. Мы благодарим Б.И.Пустыльника и А.С.Ильинова за полезное обсуждение результатов, Нгуен Так Аня за помощь в измерениях и обработке результатов, а также радиохимиков Нго Куок Быу и Нгуен Монг Шиня за помощь в радиохимическом выделении продуктов реакций.

Литература

1. Б.Н.Калинкин, В.П.Пермяков, В.М.Шилов. Препринт ОИЯИ, P4-6152, Дубна, 1971.
2. C.Y.Wong. *Phys.Rev.Lett.*, 31, 766 (1973).
3. M.Blann. *Proc. of the Intern. Conf. on Nuclear Physics*, v. 2, p. 657, Munich (1973), Noeth Holland/American Elsevier.
4. H.Gauniv, Y.Le Beyec, M.Lefort, C.Deprun. *Phys.Rev.Lett.*, 28, 697 (1972).
5. R.Bimbot, H.Gauvin, Y.Le Beuec, M.Lefort, N.T.Porile, B.Tamain. *Nucl.Phys.*, A189, 539 (1972).
6. P.Colombani, J.C.Jacmart, N.Poffe, M.Riou, C.Stephan, J.Tys. *Phys.Lett.*, 42B, 197 (1972).
7. Ю.Ц.Оганесян, Д.М.Надкарни, Нгуен Так Ань, Ю.Э.Пенионжкевич, Б.И.Пустыльник. *ЯФ*, 19, 486 /1974/.
8. L.C.Northcliffe and R.F.Shilling. *Nucl. Data Tables*, A7, 233 (1970).
9. С.А.Карамян, Ф.Нормуратов, Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, И.В.Кузнецов. *ЯФ*, 4, 690 /1968/.
10. С.А.Карамян, Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, Б.И.Пустыльник. *ЯФ*, 4, 715 /1969/.
11. H.H.Gutbrod, W.G.Winn, M.Blann. *Nucl.Phys.*, A213, 267 (1973).
12. H.J.Krappe, J.R.Nix. *Report LBL-1920* (1973).
13. R.Bass. *Phys.Lett.*, 47B, 139 (1973).
14. T.Sikkeland. *ArkFys.*, 36, 539 (1966).
15. J.O.Rasmussen, K.Sugawara-Tanaba. *Nucl.Phys.*, A171, 497 (1971).
16. M.Lefort, Y.Le Beyec, J.Peter. *Report IPNO-RC-73-04* (1973).
17. C.Y.Wong. *Phys.Lett.*, 42B, 186 (1972).

Рукопись поступила в издательский отдел 11 апреля 1974 года.