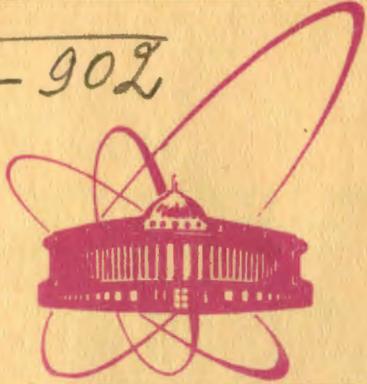


Б-902



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

5734/2-81

23/4-81

P7-81-610

В.Н.Бугров, С.А.Карамян

ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
С МОНОКРИСТАЛЛАМИ

Направлено на Советско-японский симпозиум
по взаимодействию быстрых заряженных частиц
с кристаллами /Новосибирск, 28 сентября -
2 октября 1981 г./

1981

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение эффекта теней в ядерных реакциях под действием тяжелых ионов при использовании монокристаллических мишеней позволяет получить данные о времени протекания ядерных реакций, что является фундаментальной проблемой современной физики. Исследование взаимодействия тяжелых ионов с монокристаллами представляет значительный интерес также с точки зрения получения данных об особенностях каналирования тяжелых многозарядных частиц и о радиационном повреждении кристаллической структуры. В настоящей работе представлены результаты, полученные в последние годы в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, по измерению времени протекания реакций деления ядер и по исследованию радиационного повреждения кристаллической структуры при взаимодействии тяжелых ионов с энергией 0,6-8,0 МэВ/нукл. с монокристаллами.

Впервые метод теней на пучке тяжелых ионов был применен в [1,2], что позволило получить экспериментальные данные о времени протекания реакции деления ядер. Одним из важных методических вопросов в таких экспериментах является вопрос о степени радиационного повреждения монокристалла пучком тяжелых ионов и о влиянии повреждения на результат. С другой стороны, исследование радиационного повреждения монокристаллов тяжелыми ионами само по себе имеет важное физическое и практическое значение. Причины этого: а/ наиболее высокое повреждающее действие тяжелых ионов; б/ отсутствие в литературе количественных результатов для области энергий тяжелых ионов ~1,0-10 МэВ/нукл.; в/ потребности современного материаловедения, имеющего тенденцию широкого применения ионного легирования и радиационной обработки для получения материалов с новыми свойствами.

2. РАДИАЦИОННОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Эксперимент состоит в облучении толстой монокристаллической мишени коллимированным пучком тяжелых ионов /диаметр пучка 1 мм/ и в регистрации теневой картины в угловом распределении продуктов ядерной реакции с помощью твердотельных трековых детекторов, размещенных на расстоянии 120 мм от мишени. Исследованы ядерные реакции деления при облучении монокристалла UO_2 ионами ^{12}C /81 МэВ/ и монокристалла W ионами ^{22}Ne /174 МэВ/,

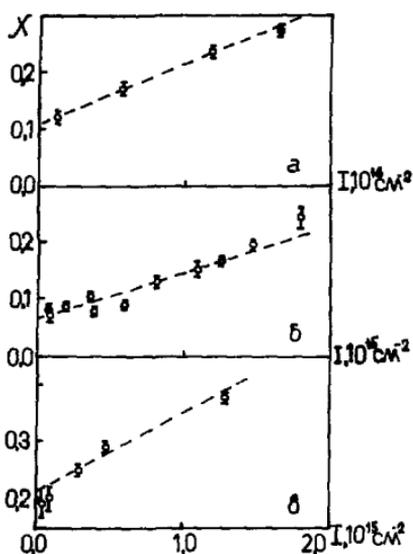


Рис.1. Зависимость глубины теневого минимума от плотности дозы облучения: а/ реакция деления ядер $W + {}^{22}\text{Ne} / 174 \text{ МэВ}$, кристаллографическая ось $\langle 111 \rangle$ - под углом 161° к пучку; б/ упругое рассеяние $W + {}^{40}\text{Ar} / 24 \text{ МэВ}$, $\langle 111 \rangle$, 161° ; в/ упругое рассеяние $\text{GaP} + {}^{31}\text{P} / 31 \text{ МэВ}$, $\langle 110 \rangle$, 95° .

а также реакции упругого рассеяния $W + {}^{40}\text{Ar} / 24 \text{ МэВ}$, $\text{GaP} + {}^{31}\text{P} / 31 \text{ МэВ}$. Пучки заряженных частиц получены на циклотронах Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Для регистрации осколков деления и рассеянных ионов ${}^{40}\text{Ar}$ применялись стеклянные детекторы, а для регистрации ионов ${}^{31}\text{P}$ - пластиковые трековые детекторы. Зафиксированная теневая картина про-

смотривалась для получения количественной характеристики теневого минимума - его глубины χ - для одной из основных кристаллографических осей монокристалла. Повреждение монокристалла приводило к заметному ухудшению качества теневой картины и к росту величины χ с увеличением интегральной плотности дозы облучения. Во всех случаях пучок направлялся на монокристалл в случайном направлении, не совпадающем с кристаллографическим выделенным направлением. Характерной особенностью эксперимента является наблюдение радиационного повреждения монокристалла, так сказать, "в момент возникновения", а не *post factum*.

Результаты измерения величины χ в зависимости от плотности дозы I приведены на рис.1. Видно, что зависимость $\chi(I)$ может быть в некотором приближении аппроксимирована прямой линией $\chi(I) = \chi_0 + RI$. Таким образом, повреждающее воздействие иона на определенный монокристалл характеризуется параметром R . Величины R , полученные в изученных случаях, приведены в таблице. Заметно, что измеренные величины χ характеризуют качество поверхности слоя монокристалла толщиной несколько $\text{мг}/\text{см}^2$ по нормали к поверхности. Толщина работающего слоя мишени меняется для различных ионов и монокристаллов, она приведена в таблице. Для взаимодействий $\text{UO}_2 + {}^{12}\text{C} / 81 \text{ МэВ}$ и $W + {}^{22}\text{Ne} / 174 \text{ МэВ}$, в которых регистрировались осколки деления и условия наблюдения были сходными, отношение величин R близко к отношению атомных тормозных потерь ионов ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{22}\text{Ne}$, считавшихся

Таблица

Результаты измерения степени радиационного повреждения монокристаллов

Мишень	UO ₂	W	W	GaP
Ион	¹⁸ C	²² Ne	⁴⁰ Ar	³¹ P
Энергия, МэВ	81	174	24	31
Толщина слоя, мг см ⁻²	5,8	3,3	1,4	0,84
R / +25% /, 10 ⁻¹⁸ см ²	3,0	10,1	84	135
R / Z ₁ ² Z ₂ ² E ⁻¹ γ, 10 ⁻²⁰ см ² МэВ	1,58	2,70	0,52	4,33

пропорциональными произведению $Z_1^2 Z_2^2 E^{-1} \gamma$, где Z_1 и E - атомный номер и энергия иона; $\gamma = \frac{A_1}{A_2}$ - отношение массовых чисел иона и мишени. В таблице приведено отношение R к фактору, характеризующему атомные тормозные потери иона. При переходе от случая $W + ^{22}\text{Ne} / 174 \text{ МэВ} /$ к $W + ^{40}\text{Ar} / 24 \text{ МэВ} /$ атомные тормозные потери увеличиваются в ≈ 40 раз, а величина R возрастает только в ≈ 10 раз. Для объяснения неполной корреляции в данном случае нужно учитывать неполное подобие деканалирования осколков деления и упруго рассеянных ионов, в том числе и различие, возникающее из-за зависимости начальной энергии рассеянного иона от толщины слоя монокристалла, в отличие от осколков деления, кинетическая энергия которых практически не зависит от толщины слоя, пройденного бомбардирующим ионом.

Полученные функции $\chi(l)$ могут быть использованы для вычисления концентрации дефектов в зависимости от плотности дозы облучения монокристаллов. При этом должна быть использована программа, учитывающая деканалирование интегрально для слоя конечной толщины и пригодная для случая тяжелых частиц, таких, как ³¹P, ⁴⁰Ar и осколки деления, в некоторых предположениях о распределении дефектов по глубине.

Рассмотрим теперь влияние радиационного повреждения на измерение ядерных времен жизни методом теней. Обычно в таких измерениях определяются глубины минимумов χ_1 и χ_2 для двух идентичных кристаллографических осей, составляющих разные углы с направлением пучка. Измеряемая величина $\Delta\chi = \chi_1 - \chi_2$ чувствительна \propto времени протекания реакции. Важным методическим

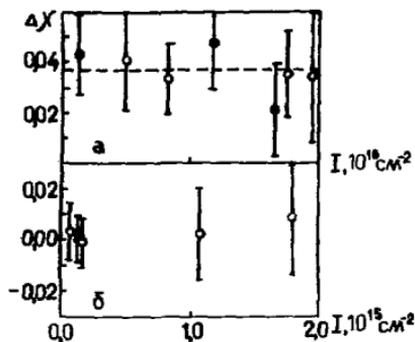


Рис. 2. Измеренные значения $\Delta\chi$ для разной плотности дозы облучения: а/ реакции деления ядер: о - $\text{UO}_2 + {}^{12}\text{C}$ / 81 МэВ/, кристаллографические оси $\langle 110 \rangle$ - под углами 90° и 150° к пучку; ● - $\text{W} + {}^{22}\text{Ne}$ / 174 МэВ/, $\langle 111 \rangle$, 90° , 161° ; б/ упругое рассеяние $\text{W} + {}^{40}\text{Ar}$ / 24 МэВ/, $\langle 111 \rangle$, 90° , 161° .

вопросом является выяснение устойчивости величины $\Delta\chi$ по отношению к радиационному повреждению монокристалла. Поэтому были сделаны измерения зависимости $\Delta\chi(I)$ для облучений $\text{UO}_2 + {}^{12}\text{C}$ / 81 МэВ/ и $\text{W} + {}^{22}\text{Ne}$ / 174 МэВ/. Результаты приведены на рис. 2а, из которого видно, что в пределах погрешности измерения не обнаруживается какого-либо изменения $\Delta\chi$ с I . Для дальнейшего контроля методики измерений были проведены модельные эксперименты, в которых сохранялась геометрия измерений времени протекания реакций, однако регистрировались не продукты деления ядер, а упруго рассеянные ионы в реакции $\text{W} + {}^{40}\text{Ar}$ / 24 МэВ/. Временная задержка упругого рассеяния равна нулю. Ставилась задача проверить, не возникает ли отличное от нуля значение $\Delta\chi$ по мере облучения монокристалла за счет методических причин, а не в результате временной задержки реакции? Результаты модельного эксперимента приведены на рис. 2б, из которого видно, что для упругого рассеяния величина $\Delta\chi$ остается равной нулю вплоть до максимальной плотности дозы ионов. Отметим, что в модельном эксперименте сохраняются почти все особенности эксперимента по измерению времени протекания реакции деления, в том числе и различие энергии частиц для двух углов ориентации кристаллографических осей относительно пучка. Таким образом, данные рис. 2а, б представляют собой веские доказательства того, что в используемой схеме измерений отличие от нуля значение $\Delta\chi$ связано с временной задержкой ядерной реакции, а не с какими-либо методическими особенностями эксперимента.

3. ВРЕМЯ ПРОТЕКАНИЯ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

При взаимодействии тяжелых ионов с ядрами происходят различные ядерные реакции, поэтому не всегда можно однозначно определить, в каком ядерном процессе образовались наблюдаемые осколки деления. Так, при облучении мишеней с $Z=60-80$ ионами

типа ^{12}C , ^{16}O , ^{22}Ne осколки деления образуются, главным образом, при распаде составного ядра - продукта слияния взаимодействующих ядер, а в случае тяжелых мишеней, типа тория, урана, заметный вклад в полное сечение деления может давать деление продуктов реакций передачи нуклонов и неполного слияния ядер мишени и бомбардирующего иона. Наличие нескольких компонент реакции деления приводит к неоднозначности извлечения временных характеристик процесса из измеренной величины $\Delta\chi$, по сути дела возникает задача определения нескольких параметров из одной измеренной величины. Количественное измерение степени радиационного повреждения монокристаллов позволяет определить еще одну величину, связанную с временем протекания реакции, χ_2^r - временной вклад в глубину теневого минимума, и, таким образом, доопределить задачу нахождения временных параметров реакции. Конкретнее можно сказать, что величина χ_2^r чувствительна, главным образом, к долгоживущим временным компонентам деления с $\tau \geq \frac{1,0\text{А}}{v}$, а величина $\Delta\chi$ - к временным компонентам, характеризующимся параметром $\tau = \frac{0,05 - 0,50\text{А}}{v}$, где v - скорость отдачи составного ядра.

В описываемых здесь экспериментах кроме измерения величин $\Delta\chi$ производилось определение χ_2^r для реакций $^{238}\text{U} + ^{12}\text{C}$ /81 МэВ/ и $\text{W} + ^{22}\text{Ne}$ /174 МэВ/. В первой реакции обнаружено значение $\chi_2^r = 0,05 \pm 0,01$, а во второй - не найдено вклада долгоживущей ветви деления при уровне чувствительности несколько процентов от полного сечения деления. Вклад долгоживущей ветви деления $\geq 5\%$ от полного сечения деления в реакции $^{238}\text{U} + ^{12}\text{C}$ /81 МэВ/ связан, очевидно, с вкладом деления продуктов прямых взаимодействий иона и мишени. Эти продукты имеют широкий спектр энергий возбуждения в области меньше энергии возбуждения составного ядра, и поэтому они могут быть относительно долгоживущими, $\tau \geq 10^{-10}\text{с}$. При этом вероятность их деления составляет заметную величину, что и объясняет экспериментальный результат. Наблюдение долгоживущей ветви деления, связанной с распадом продуктов прямых реакций, в случае $^{238}\text{U} + ^{12}\text{C}$ позволяет предположить, что и в реакциях $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}$, $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$ такая ветвь должна иметь место. Поэтому следует рассмотреть заново вопрос о вкладе этой ветви деления в измеренные значения $\Delta\chi$ для указанных реакций /4/.

На основе известных в литературе сечений, угловых распределений и спектров продуктов прямых реакций вычислен вклад в величину $\Delta\chi$ деления продуктов реакций передачи нуклонов, то есть процесса типа $(\text{HI}, z\text{A}f)$, а также деления продуктов неполного слияния с вылетом прямой α -частицы $-(\text{HI}, \alpha\text{Xnf})$. Величина $\Delta\chi$ для распада составного ядра $-(\text{HI}, \text{Xnf})$ взята на основе расчетов /5/. Результаты приведены на рис.3. Видно, что разные

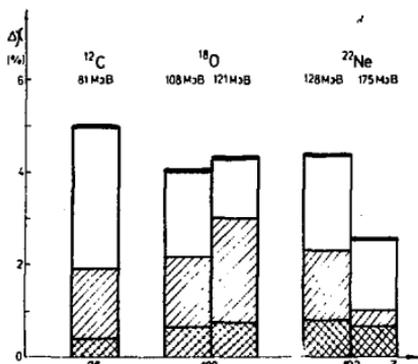
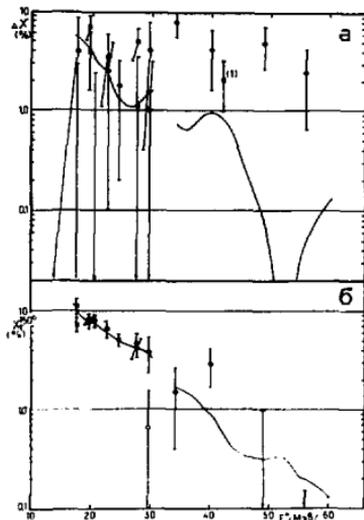


Рис. 4. Сравнение результатов измерения величин $\Delta\chi/a/$ и $\chi_2^r/б/$ с расчетом: 0 - реакция деления ядер $UO_2 + {}^4He$ /23-35 МэВ/, кристаллографические оси $\langle 110 \rangle$ под углами 90° и 150° к пучку; ● - $UO_2 + {}^3He$ /25-47 МэВ/, $\langle 110 \rangle$, 90° , 150° ; сплошная линия - результат расчета /рисунок из работы /7//.

Рис. 3. Вычисленный вклад различных процессов в величину разности глубин теневых минимумов для реакций ${}^{238}U + HI$: □ - деление составного ядра ($HI, xnfn$); ▨ - деление продуктов неполного слияния ядер с вылетом прямой α -частицы ($HI, \alpha xnfn$); ▩ - деление продуктов реакций передачи нуклонов ($HI, {}_Z^A f$).



ветви реакции деления дают сравнимый вклад в значение $\Delta\chi$, а суммарное рассчитанное значение $\Delta\chi$ близко к экспериментальным результатам /4/ для случая ${}^{238}U + HI$.

Для реакций $W + HI$ ожидается малый вклад деления продуктов прямых реакций в полное сечение деления, что и подтверждается ненаблюдением долгоживущей временной компоненты деления при измерении величин χ_2^r . Следовательно, обнаруженные /1,2/ для этой группы реакций значения $\Delta\chi$ нужно приписать, главным образом, времени протекания процесса распада составного ядра.

После того как определены величины $\Delta\chi$ и χ_2^r , соответствующие процессу распада составного ядра, возникает задача разложения этих величин на части, отвечающие вкладу деления после испускания различного числа нейтронов, то есть различным ветвям процесса типа ($HI, xnfn$). Для решения этой задачи наиболее правильным подходом является метод обратной задачи или математическое моделирование процесса с привлечением дополнительных литературных данных.

Авторы работы /6/ берут за основу гипотезу о том, что главный вклад в χ_2^T и $\Delta\chi$ вносит деление относительно слабовозбужденного испарительного остатка, то есть ветви деления (HI, xnf) при $x = 3 \pm 5$, а ветви с $x = 0 \pm 2$ дают пренебрежимо малый вклад из-за резкого убывания времени жизни ядра с ростом энергии возбуждения. Для проверки этой гипотезы нами были изучены /7/ реакции $^{238}\text{U} + ^4\text{He}$ и $^{238}\text{U} + ^3\text{He}$ при энергии ионов, перекрывающей диапазон энергии возбуждения исходных составных ядер от 18 до 56 МэВ. Выбранные реакции характеризуются значительным вкладом многих ветвей распада составного ядра с x от 0 до 5-6 /при максимальных энергиях возбуждения/ в полное сечение деления. Поэтому деление относительно слабовозбужденного испарительного остатка заведомо дает некоторый вклад в измеряемые величины $\Delta\chi$ и χ_2^T . Был выполнен модельный расчет, учитывающий вклад ветвей с x от 0 до $x_{\text{макс}}$ в $\Delta\chi$ и χ_2^T в предположении убывающих по модели ферми-газа функций времени жизни ядер в зависимости от энергии возбуждения $\tau(E^*)$. На рис. 4 приведено сравнение экспериментальных результатов с расчетом. Видно, что в области энергий возбуждения исходного составного ядра $E^* > 34$ МэВ имеет место значительное расхождение между результатами эксперимента и расчетом для величин $\Delta\chi$. Это расхождение показывает, что при значительных энергиях возбуждения, $E^* \geq 30$ МэВ, функции времени жизни $\tau(E^*)$ не убывают к малым значениям, $< 10^{-19}$ с, а выходят на уровень значений около 10^{-17} - 10^{-18} с. При этом значительный вклад в измеренные значения $\Delta\chi$ дают ветви деления после испускания малого числа нейтронов $x = 0 \pm 3$, что и объясняет наблюдаемое расхождение. Для области $E^* < 30$ МэВ расчетные и экспериментальные данные удовлетворительно согласуются. Это подтверждает адекватность расчета при тех энергиях, при которых на основе экспериментальных данных, приведенных в литературе /библиографию по этому вопросу см. в /7//, взяты правдоподобные значения функций $\tau(E^*)$ и функций вероятности деления ядер в зависимости от энергии возбуждения.

Таким образом, в экспериментах по наблюдению эффекта теней при облучении монокристаллов UO_2 , W и GaP тяжелыми ионами и ионами гелия получены следующие основные результаты:

1/ зафиксированы отличные от нуля значения характеристик теневых минимумов - $\Delta\chi$ и χ_2^T , связанных с временной задержкой реакции деления ядер;

2/ получены количественные данные о радиационном повреждении монокристаллов тяжелыми ионами. Показано отсутствие систематической методической погрешности в измерении $\Delta\chi$ и отсутствие корреляции величин $\Delta\chi$ с радиационным повреждением монокристаллов;

3/ выявлен вклад процесса деления продуктов прямых реакций в измеренные значения $\Delta\chi$ и χ_2^2 . В большинстве случаев основной вклад в $\Delta\chi$ дает процесс распада составного ядра;

4/ обнаружено, что при энергиях возбуждения исходного составного ядра с энергией 30-50 МэВ значительный вклад в измеренные значения $\Delta\chi$ дают начальные ступени распада составного ядра, то есть ветви $(\text{HI}, \text{хпf})$ с $x = 0$ и 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карамян С.А., Нормуратов Ф., Оганесян Ю.Ц. В кн.: Труды Международной конференции по физике тяжелых ионов. ОИЯИ, Д7-5769, Дубна, 1971, с.391.
2. Каманин В.В. и др. ЯФ, 1972, 16, с.447.
3. Карамян С.А., Меликов Ю.В., Тулинов А.Ф. ЭЧАЯ, 1973, 4, с.456.
4. Бугров В.Н. и др. ЯФ, 1977, 25, с.713.
5. Каманин В.В., Карамян С.А. ЯФ, 1978, 28, с.403.
6. Andersen J.U. et al. Phys. and Chemistry Fission, IAEA, Vienna, 1980, vol.1, p.387.
7. Бугров В.Н., Карамян С.А. ОИЯИ, P15-80-762, Дубна, 1980.