

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P7-85-267

С.А.Карамян, В.Н.Бугров, Н.И.Спиридонов

УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСКОЛКОВ
И ВРЕМЯ ПРОТЕКАНИЯ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ

Направлено в журнал "Ядерная физика"

1985

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах, обеспечивающих отбор продуктов ядерной реакции по Z , A и кинетической энергии, при точной фиксации энергии пучка в некоторых случаях удается наблюдать резко осциллирующие зависимости сечения от угла вылета продуктов. Например, для реакции упругого рассеяния $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$ /1/ наблюдалась осциллирующая структура углового распределения и функции возбуждения, относящаяся к образованию квазимолекулярного состояния составной системы ^{56}Ni с временем жизни $\tau > 6 \cdot 10^{-21}$ с. Интересно отметить, что подобная структура выявлена /2/ и в реакции $^{16}\text{O} + ^{40}\text{Ca}$ при фиксации того же выходного канала $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$. Последняя реакция имеет сходство с реакцией деления под действием тяжелого иона.

Угловое распределение осколков деления ядер в реакциях с тяжелыми ионами обычно является симметричным относительно 90° и монотонно зависящим от угла. Это объясняется усреднением по состояниям входного канала и продуктам распада системы. Вместе с тем детальный поиск тонкой структуры углового распределения осколков не производился. Несмотря на имеющееся большое количество работ, вопрос детально не исследован, так как угловое разрешение эксперимента, шаг по углу и статистическая точность данных в большинстве случаев неадекватны поиску особенностей углового распределения. Необходимо выяснить также, какой вид углового распределения соответствует процессам деления тяжелых ядер после реакций с неполной передачей импульса. Кроме того, деление неравновесной системы, предлагаемое в ряде работ /3-5/, также может характеризоваться нерегулярностями в ходе угловой зависимости выхода осколков. Для получения информации об этих особенностях процесса подробно измерены угловые распределения осколков при делении ядер ^{238}U ионами ^4He , ^{12}C , ^{22}Ne .

1. ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В опыте использована камера, предназначенная для измерения эффекта теней на пучке тяжелых ионов /6/, т.е. с ее помощью обеспечивается угловое разрешение эксперимента лучше $\pm 0,3^\circ$. Шаг по углу выбран равным $\sim 2^\circ$, существенно детальнее вести измерения нет необходимости из-за разброса углов за счет испускания нейтронов на стадии разлета осколков деления. Слой двуокиси ^{238}U толщиной $0,4 \text{ мг/см}^2$ на подложке из алюминия облучали пучком

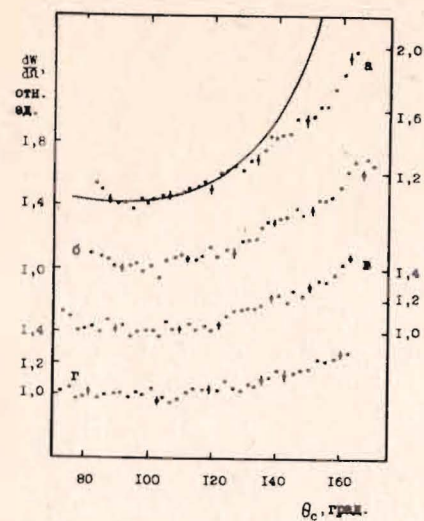


Рис.1. Угловые распределения осколков деления в с.д.и. для реакций $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$ при энергии ионов 90 и 81 МэВ /а,б/ и $^4\text{He} + ^{238}\text{U}$ 35 и 25 МэВ /в,г/ соответственно. Сплошной линией показана зависимость $\sin^{-1}\theta_c$.

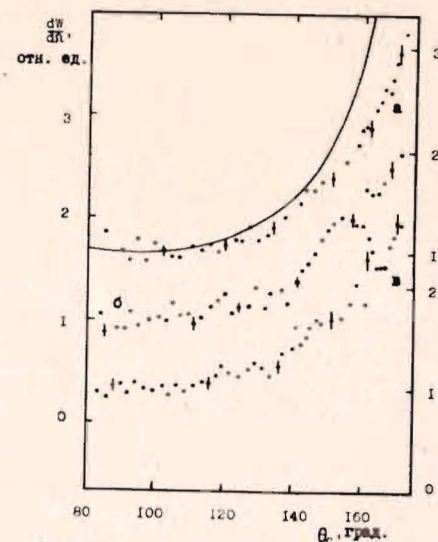


Рис.2. То же, что и на рис.1, для реакций $^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U}$ при энергии ионов 175, 143, 125 МэВ /а,б,в/.

ионов циклотронов У-200 и У-300 ЛЯР ОИЯИ. Диаметр пучка составлял 1 мм. Энергия ионов ^{12}C и ^{22}Ne изменялась с помощью Al поглотителей, ионов ^4He также изменением радиуса вывода пучка из циклотрона У-200. На расстоянии 120 мм от мишени в диапазоне углов $75-168^\circ$ размещались стекла-детекторы осколков деления. После химической обработки, просмотра стекол и учета геометрических факторов определяли угловое распределение осколков. Эксперимент для каждой реакции повторялся дважды, стекла проматривались дважды разными просмотрщиками, результаты суммировались для увеличения статистики и исключения систематических погрешностей. Каждое угловое распределение состояло из ~ 40 точек, содержащих ~ 2000 отсчетов каждая. Значительно увеличить статистику было затруднительно из-за большого объема просмотра.

Результаты показаны на рис.1,2. Несмотря на имеющиеся нерегулярности в расположении точек, отклонение их от монотонной зависимости не превышает двух стандартных отклонений почти во всех случаях. Поэтому нет оснований говорить о наблюдении тонкой структуры углового распределения осколков деления ни в одной из изучавшихся реакций. Наблюдаемая анизотропия не противоречит литературным данным /7-9/. Выявляются однако некоторые детали. В случае ионов ^{12}C и ^{22}Ne , особенно при максимальной энергии,

производная углового распределения не убывает в области больших углов, т.е. $W(\theta_c)$ продолжает заметно нарастать и в диапазоне $\theta_c = 160-170^\circ$. Кроме того, зависимость анизотропии от энергии ионов ^{22}Ne оказывается довольно слабой.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работах ^{9-12/} показано, что поведение анизотропии осколков деления для многих реакций с тяжелыми ионами подчиняется определенным эмпирическим закономерностям, однако не соответствует стандартной модели вращающейся жидкой капли, на основе которой вычисляют величины K_0^2 и $J_{сф} / J_{эфф}$. Поэтому здесь не делается обработка результатов по стандартной теоретической модели, вместо этого предпринята попытка определить роль процесса деления после реакции с неполной передачей импульса в формировании наблюдаемого углового распределения. Схема этого процесса показана на рис.3. Тяжелый продукт неупругого взаимодействия ядер имеет угловой момент, выстроенный преимущественно в плоскости, перпендикулярной пучку, так же как и составное ядро. Осколки деления испускаются в плоскости, перпендикулярной угловому моменту, поэтому угловое распределение в системе, связанной с делящимся ядром, должно быть качественно подобным распределению в случае деления составного ядра. Главное различие состоит в направлении вектора скорости делящегося ядра, что приводит к трансформации углового распределения за счет кинематических факторов. Составное ядро покоится в с.ц.и., а продукт неупругого взаимодействия характеризуется распределением вектора скорости в той же системе. Зависимость сечения от энергии и угла вылета легких продуктов реакций неупругого взаимодействия измерялась во многих работах/например, ^{13-15/}, следовательно, имеется возможность вычислить угловое распределение и скорость тяжелых продуктов /ядер отдачи/ неупругого взаимодействия. После этого можно рассчитать угловое распределение осколков $W_c(\theta_c)$ путем интегрирования выхода осколков по угловому распределению делящихся ядер $\sigma_R(\theta_R^c)$:

$$W_c(\theta_c) = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{(1 + \gamma^2 + 2\gamma \cos \theta_f)^{3/2}}{|1 + \gamma \cos \theta_f|} W_0(\theta) \sigma_R(\theta_R^c) d\theta_R^c, \quad /1/$$

где $\gamma = v_R(\theta_R^c) / v_f$ - отношение скорости ядра отдачи в с.ц.и. к скорости осколка деления, θ и θ_f - углы вылета осколка относительно направления пучка и направления движения ядра отдачи в системе, связанной с последним, $W_0(\theta)$ - исходное угловое распределение в той же системе. Величины θ_f и θ вычисляются по формулам:

$$\sin(\theta_f \mp \theta_c \pm \theta_R^c) = \gamma \sin(\pm \theta_c \mp \theta_R^c); \quad /2/$$

$$\theta = \pm \theta_f + \theta_R^c. \quad /3/$$

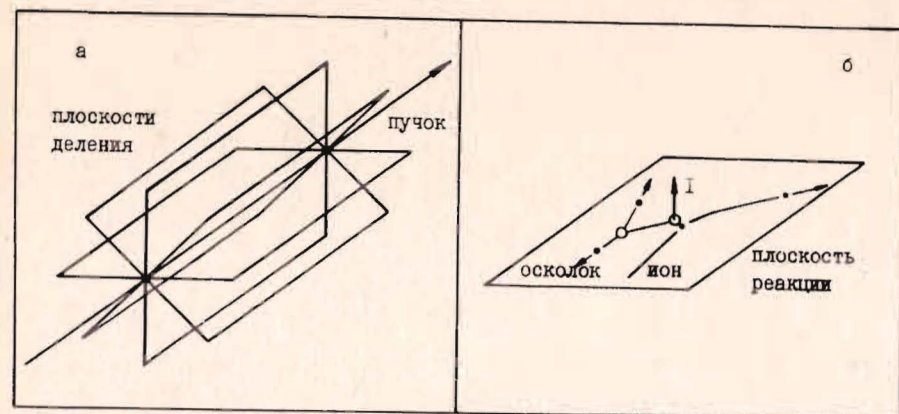


Рис.3. Расположение плоскостей деления относительно пучка частиц /а/ и схема процесса деления после неупругого взаимодействия сталкивающихся ядер /в с.ц.и./ /б/.

Путем замены в формулах /1-3/ индексов с на L можно вычислить также угловое распределение осколков в лабораторной системе на основе известного углового распределения ядер отдачи в л.с. $\sigma_R(\theta_R^L)$. Заметим, что в рассматриваемом случае распределения $W_c(\theta_c)$ и $W_L(\theta_L)$ связаны несколько другими коэффициентами, чем при распаде составного ядра, потому что скорость осколка становится зависящей от угла в с.ц.и.

Вычисления углового распределения осколков при делении продуктов реакций с неполной передачей импульса сделаны по формуле /1/ для трех вариантов реакций: (A,af) при энергии ионов $E = 1,3$ В, (A,A'f) при $E = 1,1$ В и (A,A'f) при $E = 1,6$ В, где А - ион типа неона, В - барьер ядерного взаимодействия. Исходное угловое распределение $W_0(\theta)$ считалось одинаковым* во всех процессах для выявления роли кинематических факторов в чистом виде. Угловые распределения α -частицы и легкого /частицеподобного/ продукта неупругого взаимодействия взяты на основе работ ^{13-15/}. Результаты приведены на рис.4. Видно, что угловое распределение осколков в с.ц.и. существенно искажается, даже испускание относительно легкой α -частицы приводит к появлению вперед-назад асимметрии около 15%, еще большее искажение в случае процесса (A,A'f). В последнем случае угловое распределение частицы А' резко изменяется с энергией падающего иона, соответственно проис-

* Распределение $W_0(\theta)$ чувствительно к изменению Z, энергии возбуждения, степени выстроенности и среднего значения углового момента делящегося ядра. Эти факторы воздействуют противоположным образом на анизотропию, поэтому принятое приближение довольно реально.

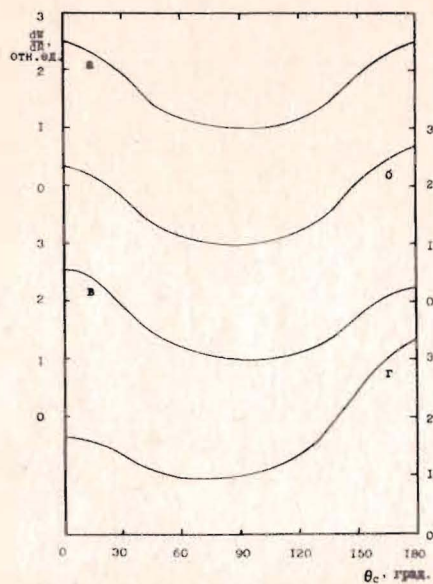


Рис. 4. Вычисленные по формуле /1/ угловые распределения осколков в с.ц.и. для деления: составного ядра /а/, продукта реакции испускания α -частиц /б/, ядра отдачи неупругого взаимодействия при энергии иона, равной 1,1 В и 1,6 В /в, г/.

ходит изменение знака асимметрии углового распределения осколков. На основе данных рис. 4 ясно, что в том случае, когда вклад процессов с неполной передачей импульса значителен, наблюдаемое угловое распределение осколков может быть существенно изменено по сравнению с компонентой, относящейся к делению составного ядра. Надо сказать, что вылет α -частиц

характеризуется высокой вероятностью для большинства реакций с тяжелыми ионами, поэтому пренебречь вкладом процессов ($A, \alpha f$), по-видимому, нельзя во многих реакциях деления. В частности, наблюдаемое нами /рис. 1, 2/ заметное нарастание углового распределения осколков в области углов θ_c около $160-170^\circ$ для реакций ^{12}C , $^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U}$ можно отнести к влиянию процессов деления продуктов реакций с неполной передачей импульса. Определение анизотропии осколков деления составного ядра остается в большинстве работ неточным, так как не учитываются обсуждаемые здесь процессы, а вклад ветвей деления после испускания каскада нейтронов моделируется неоднозначно /16, 17/. При этом детальный теоретический анализ измеренных параметров анизотропии вряд ли может дать надежные физические выводы.

3. УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДУКТОВ И ВРЕМЯ ПРОТЕКАНИЯ РЕАКЦИИ

Наблюдение отличия анизотропии осколков деления от стандартной теории интерпретируется авторами /3, 4/ как указание на предравновесный характер процесса. Целесообразно понять, какие особенности распределения продуктов по углу могут использоваться для выяснения механизма реакции. В работе /4/ сделано неточное утверждение о том, что распределение вида $\sin^{-1}\theta_c$ соответствует быстрому делению. Как хорошо известно /18/, распределение $\sin^{-1}\theta_c$ возникает при выполнении двух условий: а/ деление происходит в плоскости, строго перпендикулярной угловому моменту $K = 0$;

б/ делящаяся система делает несколько оборотов перед развалом. Схема формирования распределения $\sin^{-1}\theta_c$ показана на рис. 3а. При выполнении условия $K = 0$ плоскости деления пересекаются вдоль линии пучка. Второе условие обеспечивает равномерное распределение направлений деления в каждой плоскости. Число плоскостей, пересекающих элемент телесного угла, пропорционально $\sin^{-1}\theta_c$, что и определяет угловое распределение. Время существования системы, большее нескольких периодов вращения, не соответствует быстрому делению, поэтому распределение $\sin^{-1}\theta_c$ отвечает делению равновесной системы. Возможность оценки времени протекания процесса путем сравнения его с периодом вращения предложена в /19/ применительно к делению ядер тяжелыми ионами. В работе /4/ время деления ошибочно сравнивается с недостаточно определенным временем установления равновесия по угловым степеням свободы. Если длительность деления меньше периода вращения, то может возникать вперед-назад асимметрия углового распределения, когда тяжелый осколок вылетает преимущественно вперед, а легкий - назад. Этого типа асимметрия наблюдается для реакции $^{208}\text{Pb} + ^{58}\text{Fe} /20/$, и сделана правильная оценка времени протекания реакции деления $\tau \approx 0,9 \cdot 10^{-20}$ с. Прямой /быстрый/ механизм деления, когда направление деления задается колебанием, возбуждаемым налетающей частицей, может давать угловое распределение с максимумами типа известного для прямых реакций передачи нуклонов. В этом случае должна наблюдаться также вперед-назад асимметрия вылета легких и тяжелых продуктов. Угловое распределение с максимумами не наблюдалось /по литературе/ для осколков деления, не обнаружено оно и в настоящих измерениях.

Симметричные относительно 90° угловые распределения без структурных особенностей получены почти для всех изучавшихся реакций деления, в том числе и для таких тяжелых систем, как $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} /21/$. Отсюда можно получить информативную оценку времени жизни делящейся системы. Период одного оборота системы вычисляется по формуле

$$T_{\text{вр}} = \frac{4,14 J}{\ell + 1/2} \cdot 10^{-21} \text{ с}, \quad /4/$$

где J - момент инерции системы в МэВ^{-1} , ℓ - угловой момент в ед. \hbar . Для тяжелой ядерной системы изменению $\ell = 10-100 \hbar$ отвечает интервал $T_{\text{вр}} = 10^{-19}-10^{-20}$ с. Результаты измерения угловых распределений в реакциях $^{50}\text{Ti}/250 \text{ МэВ}/ + ^{208}\text{Pb}/21/$ и $^{22}\text{Ne}/125 \text{ МэВ}/ + ^{238}\text{U}$ /настоящая работа/ сравниваются на рис. 5. Составные ядра близки по атомному номеру $Z = 104$ и 102 , по угловому моменту $\ell = 20-25 \hbar$, а энергия возбуждения ядра в первой реакции значительно меньше, чем во второй, 32 и 60 МэВ соответственно. Это различие частично объясняет различные анизотропии. Кроме того, видно, что измерения /21/ дают некоторую вперед-назад асимметрию углового распределения, одинаковую для легкого и тяжелого ос-

Рис. 5. Угловые распределения осколков в реакциях $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}/^{21}$ при энергии ионов 250 МэВ (○, Δ) и $^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U} - 125$ МэВ, настоящая работа (●).

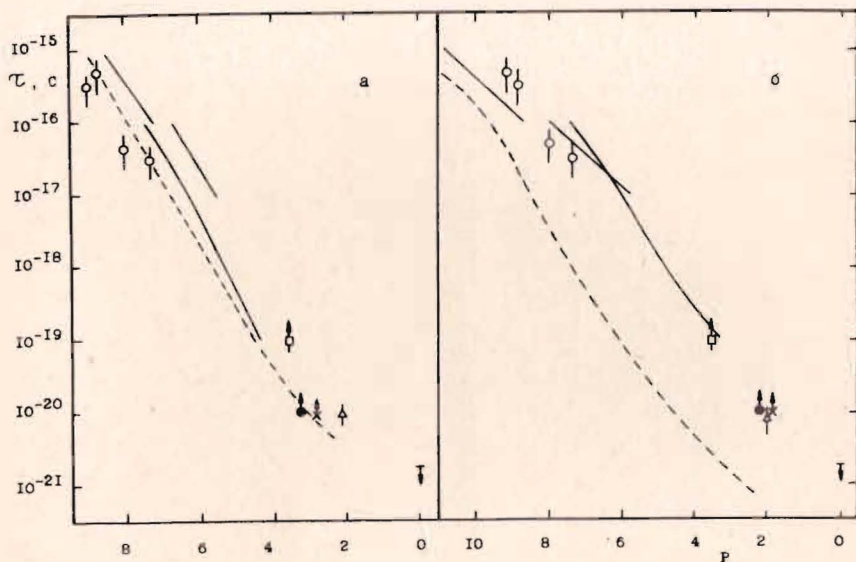
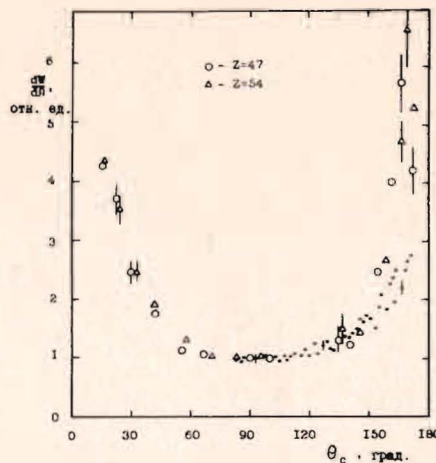


Рис. 6. Систематика длительности распада составного ядра при использовании ядерной температуры по работе $^{30}/a/$ и по модели ферми-газа $/b/$. Сплошные линии - результаты измерений для реакций деления ядер $^{22-24}/$, штриховые - расчет, выполненный в работах $^{30}/a/$ и $^{31}/b/$. Точки: ○ - измерения для реакций испускания протонов $^{25-28}/$, Δ, □, ● - оценки на основе измеренных $^{20,21,29}/$ угловых распределений продуктов, × - на основе спектров нейтронов $^{30}/$.

колков, что может объясняться вкладом процесса ($^{50}\text{Ti}, af$). С учетом сказанного можно считать, что вид углового распределения осколков не дает явных указаний на существенное различие механизма деления в реакциях $^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U}$ и $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$. По формуле $/4/$, используя условие $\tau > T_{\text{вр}}$, можно оценить время протекания реакции деления.

На рис. 6 приведена систематика длительности распада составного ядра, включены результаты измерений с помощью метода, основанного на эффекте теней $^{22-25}/$, с помощью метода рентгеновского излучения К-вакансий $^{26-28}/$, а также оценки длительности по угловому распределению продуктов, измеренному в работах $^{20,21,29}/$ и по спектру нейтронов $^{30}/$, испускаемых продуктами глубоко неупругих реакций в системе $^{86}\text{Kr} + ^{166}\text{Er}$. В качестве систематизирующего параметра использована статистическая по смыслу величина

$$P = -\ln \sum_i \exp\left(-\frac{V_i}{T}\right), \text{ где } V_i - \text{ энергия активации канала распада составного ядра. Величины } V_i \text{ считались равными } V_f, \bar{V}_n \text{ и } \bar{V}_p + 0,6 V_c$$

для основных каналов распада - деления, испускания нейтронов и протонов. Усреднение V_n и V_p сделано по четности числа нейтронов и протонов с целью учета зависимости плотности уровней от энергии спаривания. Кулоновский барьер протона V_c взят с фактором 0,6 в связи с его высокой проницаемостью. На рис. 6 дано также предельно малое значение τ при $P = 0$, соответствующее времени столкновения тяжелых ядер $^{32}/$. Значения температуры вычислены в двух вариантах: по систематике работы $^{30}/ T = 2,22 (U/A)^{1/3}$ /рис. 6а/ и по модели ферми-газа $T = 3,16 (U/A)^{1/2}$ /рис. 6б/, где U - тепловая энергия возбуждения ядра. По данным рис. 6 видно, что имеющиеся результаты измерений и пределы, основанные на экспериментальных данных, хорошо укладываются на общую зависимость $\tau(P)$. Следовательно, подтверждается распад равновесного составного ядра для включенных в систематику реакций. Кроме того, видно, что статистический расчет при использовании температуры по систематике $^{30}/$ дает величины τ , близкие к измеренным значениям, в широком интервале изменения температуры и, соответственно, параметра P . Вместе с тем в модели ферми-газа значения τ почти на два порядка величины меньше, чем экспериментальные значения в области немалых энергий возбуждения $U > 20$ МэВ.

Оценка длительности реакции на основе измеренного углового распределения продуктов может делаться не только для деления, но и для реакций испускания других частиц. В тех случаях, когда измерения дают симметричное относительно 90° распределение, можно считать, что $\tau > T_{\text{вр}}$, независимо от того, проходит реакция через стадию образования составного ядра или нет.

Авторы благодарны Г.Н.Флерову и Ю.Ц.Оганесяну за интерес к работе, группам эксплуатации циклотронов У-300 и У-200 ЛЯР за получение пучков ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Betts R.R. et al. Phys.Lett., 1981, 100B, p.117.
2. Bromley D.A. Proc.Int.Conf.on Nucl.Phys. Bologna, Tipografia Compositori, 1983, vol.2, p.3.
3. Back V.B. et al. Phys.Rev.Lett., 1983, 50, p.818.
4. Ramamurty V.S., Kapoor S.S. Phys.Rev.Lett., 1985, 54, p.178.
5. Музычка Ю.А., Пустыльник Б.И. Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. ОИЯИ, Д7-83-644, Дубна, 1983, с.420.
6. Бугров В.Н. и др. ЯФ, 1977, 25, с.713.
7. Карамян С.А. и др. ЯФ, 1967, 6, с.494.
8. Заика Н.И. и др. ЯФ, 1980, 31, с.43.
9. Vaz L.C., Alexander J.M. Z.Phys., 1983, A312, p.163.
10. Rossner H. et al. Phys.Rev., 1983, C27, p.2666.
11. Tsang M.B. et al. Phys.Rev., 1983, C28, p.747.
12. Lesko K.T. et al. Phys.Rev., 1983, C27, p.2909.
13. Britt H.C., Quinton A.R. Phys.Rev., 1961, 124, p.877.
14. Артюх А.Г. и др. ЯФ, 1973, 17, с.1126.
15. Артюх А.Г. и др. ЯФ, 1978, 28, с.1154.
16. Vigdor S.E. et al. Phys.Rev., 1982, C26, p.1035.
17. Hinde D.J. et al. Nucl.Phys., 1982, A385, p.109.
18. Халперн И. Деление ядер. Физматгиз, М., 1962.
19. Карамян С.А. Автореферат диссертации. ОИЯИ, 7-4448, Дубна, 1969.
20. Bock R. et al. Nucl.Phys., 1982, A388, p.334.
21. Lützenkirchen K. et al. GSI Scientific Report, 1983, p.25, Darmstadt, 1984.
22. Воротников П.Е. и др. ЯФ, 1982, 36, с.1073.
23. Бугров В.Н., Карамян С.А. ЯФ, 1981, 34, с.577.
24. Бугров В.Н., Карамян С.А. ЯФ, 1984, 40, с.857.
25. Gibson W.M. et al. Nucl.Phys., 1979, A317, p.313.
26. Hardy J.C. et al. Phys.Rev.Lett., 1976, 37, p.133.
27. Chemin J.F. et al. Nucl.Phys., 1979, A331, p.407.
28. Röhl S. et al. Phys.Rev.Lett., 1979, 43, p.1300.
29. Sobotka L.G. et al. Phys.Rev.Lett., 1983, 51, p.2187.
30. Карамян С.А. ЯФ, 1984, 40, с.347.
31. Hagelund H., Jensen A.S. Phys.Scr., 1977, 15, p.225.
32. Backe H. et al. Phys.Rev.Lett., 1983, 50, p.1838.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 апреля 1985 года.

Карамян С.А., Бугров В.Н., Спиридонов Н.И. P7-85-267
Угловое распределение осколков и время протекания реакции деления

Выполнен эксперимент по детальному измерению углового распределения осколков деления при облучении ^{238}U ионами ^4He , ^{12}C и ^{22}Ne . В пределах погрешности измерений $\sim 2-3\%$ не выявлены структурные особенности распределений. Монотонная зависимость сечения от угла характеризуется величиной анизотропии, согласующейся с литературными данными. Форма углового распределения позволяет предположить заметный вклад деления после реакций с неполной передачей импульса. Обсуждены возможные особенности углового распределения в случае деления предравновесной системы. На основе измеренных угловых распределений сделана оценка длительности некоторых реакций. Дана систематика времени жизни составного ядра в диапазоне $10^{-20}-10^{-15}$ с.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Karamian S.A., Bugrov V.N., Spiridonov N.I. P7-85-267
Fragment Angular Distribution and Duration of Nuclear Fission Reaction

Detailed measurements of fission fragment angular distributions are carried out at the irradiation of ^{238}U target with ^4He , ^{12}C and ^{22}Ne ions. Structure peculiarities of the distributions have not been found within the limits of 2-3% experimental errors. Regular dependences of the cross section on the angle are characterized by the anisotropy values which agree with the published data. The shape of angular distribution permits to assume a noticeable contribution of fission after reactions with incomplete momentum transfer. Possible peculiarity of angular distribution in the case of preequilibrium system fission is discussed. The estimation of time duration has been performed for several reactions on the base of angular distributions. Systematics of the compound nuclei lifetimes in the $10^{-20}-10^{-15}$ interval is presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985