

24/4-

К-18

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1375/2-72

P7 - 6291



В.В.Каманин, С.А.Карамян, А.М.Кучер,
Ф.Нормуратов, Ю.Ц.Оганесян

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ
СОСТАВНОГО ЯДРА С ПОМОЩЬЮ
ЭФФЕКТА ТЕНЕЙ

1972

P7 - 6291

В.В.Каманин, С.А.Карамян, А.М.Кучер,
Ф.Нормуратов, Ю.Ц.Оганесян

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ
СОСТАВНОГО ЯДРА С ПОМОЩЬЮ
ЭФФЕКТА ТЕНЕЙ

Направлено в ЯФ

Соединенный институт
ядерных исследований
Библиотека

Введение

В 1965 году была высказана идея ^{/1,2/} об использовании эффекта теней в угловых распределениях продуктов ядерных реакций для определения времен жизни составных ядер в диапазоне $\tau < 10^{-15}$ сек. В настоящее время после выполнения ряда экспериментов ^{/3-8/} можно утверждать, что данный метод действительно чувствителен к обнаружению эффектов конечного времени жизни ядерной системы (τ), если 10^{-15} сек $\tau < 10^{-19}$ сек. Однако для дальнейшей разработки количественной стороны метода требуется теоретическое и экспериментальное исследование целой группы вопросов по двум направлениям: 1. Проблема количественной обработки результатов с целью извлечения точного значения времени жизни составного ядра (в основном, дальнейшая разработка теории эффекта теней и выбор феноменологических параметров теории). 2. Методические вопросы правильной постановки эксперимента, определение условий опыта, свободных от внесения систематических погрешностей в результат.

Среди экспериментов ^{/3-8/} значительная часть работ посвящена определению времен жизни составных ядер для реакции деления. В ^{/7/} зафиксировано проявление конечного времени жизни составного ядра в

интенсивности эффекта теней для реакции $W(^{22}\text{Ne}, f)$ и получено значение $\tau = (2-4)10^{-18}$ сек.

В настоящей работе описаны некоторые методические эксперименты, в которых на примере указанной реакции исследуется, каким образом изменение условий опыта влияет на результат и его точность. Полученные в работе эмпирические закономерности могут быть распространены на целую группу экспериментов, в которых методом теней изучается реакция деления. В этом смысле работа отвечает на некоторые вопросы 2-ой группы (см. выше).

Калибровка метода, разностные измерения

Сущность эффекта теней заключается в наличии минимумов интенсивности в направлениях кристаллографических осей и плоскостей в угловых распределениях продуктов ядерной реакции при использовании монокристаллической мишени. Для измерения времени жизни используется тот факт, что глубина минимумов (χ) зависит от среднего сдвига излучающего ядра из узла решетки за счёт отдачи в ядерной реакции и, следовательно, от времени жизни ядра. В то же время глубина минимумов зависит также от качества монокристалла и других методических факторов. Так что, в общем случае, выход частиц в направлении кристаллографической оси (χ) состоит из двух компонент - методической и физической. При выделении физической составляющей глубины тени методическая компонента играет роль, аналогичную роли фона для других каких-либо экспериментов. Поэтому естественно поставить задачу измерения фона в том же самом эксперименте и вычитания его. Эта задача имеет несколько решений: 1. В опытах по неупругому рассеянию протонов ^{/3,4/} методическая составляющая была получена путем измерения тени для упруго рассеянных протонов в предположении, что упругое рассеяние происходит мгновенно на несмещенных ядрах. 2. В ^{/5/} сравнивались кар-

тины теней в угловых распределениях осколков деления для двух различных энергий бомбардирующих частиц. Предполагалось, что для большей энергии время жизни составного ядра пренебрежимо мало и наблюдаемая глубина тени имеет методическую природу. Данный вариант эксперимента кажется неудачным, так как, во-первых, требует по-существу предполагать вид зависимости времени жизни составного ядра от энергии бомбардирующих частиц, и, во-вторых, необходимо иметь гарантию абсолютной идентичности в методическом отношении двух различных опытов, что представляется затруднительным. 3. Наконец, в ряде работ^{/6-8/} используется измерение угловой зависимости эффекта теней. В одном и том же опыте измеряются тени, соответствующие двум идентичным осям, ориентированным различным образом по отношению к пучку. Если угол между направлением пучка и кристаллографической осью близок к 0° или к 180° , то нормальное смещение ядра отдачи относительно цепочки атомов будет малым даже для значительного времени жизни составного ядра. Поэтому глубина тени для оси, ориентированной в направлении, близком к пучку, будет иметь в основном методическую природу, а для оси, перпендикулярной пучку, эффект конечного времени жизни составного ядра дает максимальный вклад в глубину тени. Этот вариант методики кажется таким же привлекательным, как и первый, поскольку здесь решается основная задача - измерение фона непосредственно в том же опыте, что и эффект.

Однако и первый и третий варианты методики имеют один, возможно, существенный недостаток. Измерение фона (методической составляющей тени) производится для частиц, имеющих иную энергию, чем частицы, регистрируемые при измерении эффекта. В варианте 1 это очевидно, поскольку методическая составляющая измеряется для упругого рассеяния, а эффект - для неупругого рассеяния. В варианте 3 изменение энергии частиц - продуктов одного и того же канала реакции в зависи-

мости от лабораторного угла связано с кинематическим эффектом действия переносной скорости составного ядра. Эти изменения не всегда велики, однако для исследовавшегося нами случая - деления ядер ускоренными тяжелыми ионами (^{22}Ne , ^{31}P)-энергии осколков деления, движущихся под углами 90° и 160° к пучку, отличаются в 1,5 - 2 раза.

Поэтому необходимо было поставить опыты с целью определения зависимости глубины тени от энергии частицы-продукта реакции. Отметим, что теория эффекта теней не даёт сколько-нибудь определенных указаний на характер этой зависимости, поскольку имеются факторы, действующие как в сторону углубления тени с ростом энергии частиц, так и в противоположном направлении. Измерение энергетической зависимости эффекта теней было выполнено для реакции упругого рассеяния ионов криптона - ^{84}Kr , которые были ускорены на третьей гармонике высокочастотного напряжения на циклотроне ЛЯР У-300 до энергии 74 Мэв. Уменьшение энергии частиц осуществлялось с помощью алюминиевых фольг. На рис. 1 показаны картины теней в угловом распределении упруго рассеянных ядер ^{84}Kr на угол 90° в направлении оси $\langle 111 \rangle$ кристалла вольфрама для двух энергий частиц 74 и 47 Мэв. Видно, что при меньшей энергии частиц тень оказывается значительно более широкой, чем при энергии 74 Мэв, в согласии с теорией, предсказывающей зависимость вида $\psi_{1/2} \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$ для угловой ширины тени. Глубина же тени практически не меняется с изменением энергии, анализ данных показывает, что возможное различие не превышает статистическую точность в определении указанного различия. Поскольку ионы криптона имеют энергию, заряд и массу, близкие к значениям этих же величин для осколков деления в реакциях типа $W(HI, f)$, то полученный результат относительно отсутствия энергетической зависимости глубины тени может быть распространен на опыты с осколками деления.

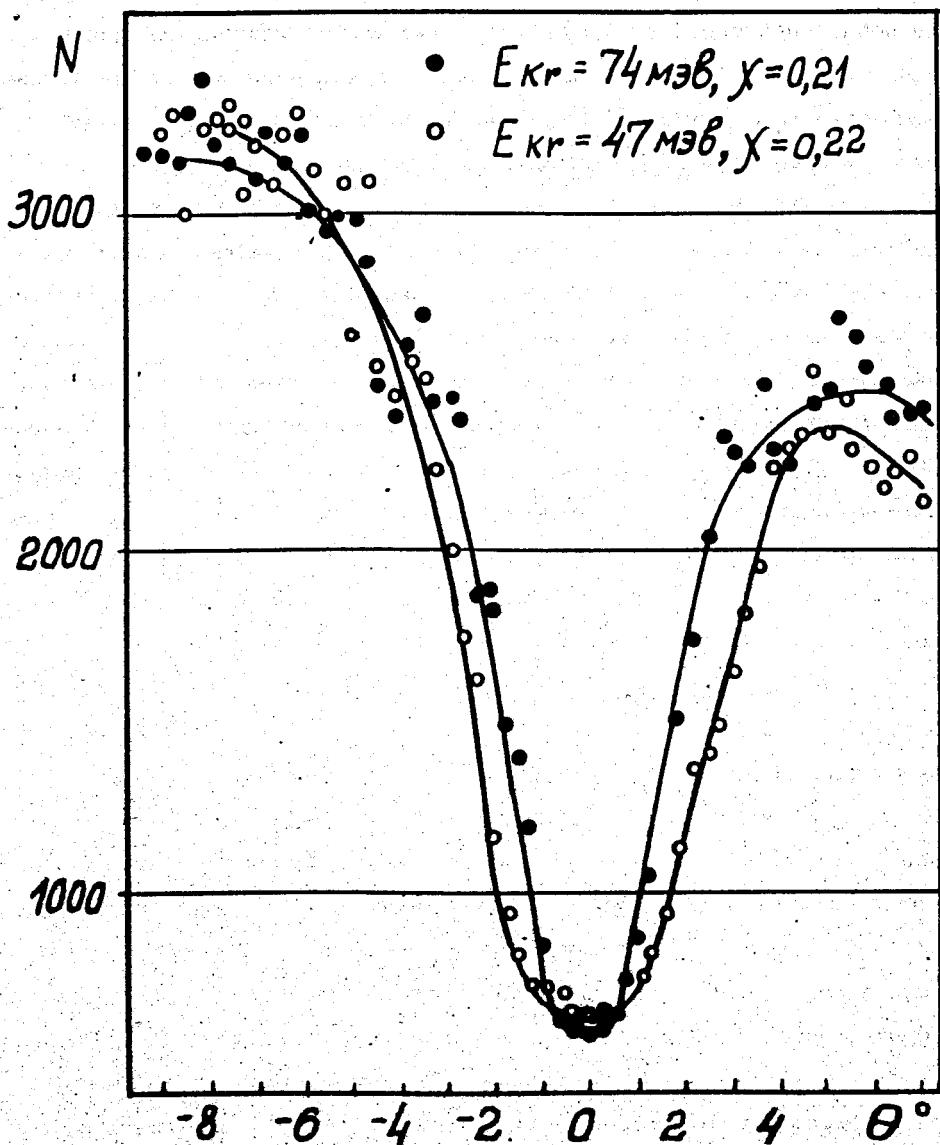


Рис. 1. Картина теней в угловом распределении упруго рассеянных нейтронов ^{84}Kr при двух значениях энергии (47 и 74 МэВ) вблизи оси $\langle 111 \rangle$ кристалла вольфрама, ориентированной под углом 90° к пучку.

В серии опытов по наблюдению эффекта теней для осколков деления при облучении монокристаллов тантала и вольфрама различными тяжелыми ионами /7,8/ мы получили также доказательство весьма слабой зависимости глубины тени от энергии осколков деления. Разница энергий осколков деления, движущихся в направлениях 90° и 160° , существенно зависит от энергии и массы бомбардирующей частицы, и для изученных реакций меняется в пределах от 20 до 50 Мэв. При сильной зависимости глубины теней от энергии осколков должно было бы наблюдаться систематическое изменение разницы глубин теней $\Delta\chi = \chi_{90^\circ} - \chi_{160^\circ}$ с увеличением $\Delta E_f = E_f^{90^\circ} - E_f^{160^\circ}$. На рис. 2 наглядно проявляется отсутствие какой-либо корреляции величин $\Delta\chi$ и ΔE_f . Разность $\Delta\chi$ меняется случайным образом с ростом ΔE_f , что отражает отсутствие внутренней взаимосвязи величины времени жизни составного ядра и параметра ΔE_f .

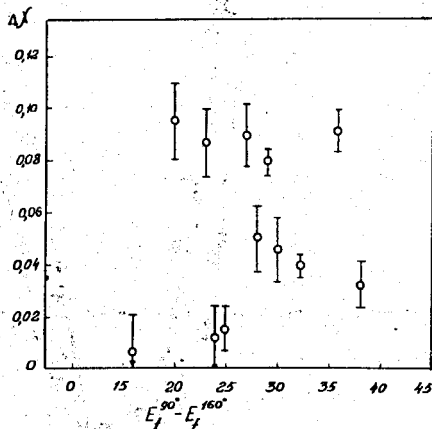


Рис. 2. Зависимость разности глубин теней $\Delta\chi = \chi_{90^\circ} - \chi_{160^\circ}$ от разности энергий осколков деления $\Delta E_f = E_f^{90^\circ} - E_f^{160^\circ}$, полученная в опытах по делению ядер ^{181}Ta и ^{186}W ионами ^{12}C , ^{16}O , ^{22}Ne , ^{31}P .

Из сказанного следует, что энергетическая зависимость глубины теней является слабой для осколков деления в энергетическом диапазоне 20-80 Мэв.

Влияние качества монокристалла

Основным отклонением от совершенства, существенным для эффекта теней, является наличие в монокристалле атомов, смещенных из узлов решетки. При этом не важна физическая природа процессов, приводящих к образованию смещенных атомов. Будь-то тепловые колебания решетки или дислокации, поликристаллические включения или примеси - все эти эффекты при одинаковой плотности и распределении дислоцированных атомов в объеме монокристалла оказывают одинаковое влияние на глубину теней. Следовательно, методическая глубина тени является хорошей мерой качества монокристалла /9/. В дальнейшем, говоря о качестве монокристалла, мы не будем конкретизировать природу и плотность повреждений кристаллической структуры, а будем судить о качестве лишь по глубине тени.

Наличие в объеме кристалла дислоцированных атомов двояким образом уменьшает глубину теней: во-первых, за счёт вклада реакций, протекающих на смещенных атомах, и, во-вторых, за счёт эффекта рассеяния продуктов реакции на дислоцированных атомах в направлениях осей и плоскостей. Напомним, что рассеяние на атомах, не смещенных из узлов решетки, не дает вклада в направления осей и плоскостей; возникает так называемая вторичная тень. В случае существенного вклада вторичной тени в полную глубину тени не должно выполняться предположение об аддитивном сложении методической и физической составляющих тени, которое используется при выделении физической компоненты. Эффекты рассеяния продуктов ядерной реакции особенно существенны для большого заряда и малой энергии частиц и при использовании толстой

мишени. Все эти условия имеют место в опытах с осколками деления. Необходимо было экспериментально проверить, как зависит измеряемый в опыте эффект конечного времени жизни составного ядра от качества используемого монокристалла.

На рис. 3 показана зависимость разности $\Delta\chi = \chi_{90^\circ} - \chi_{160^\circ}$ от качества монокристалла (χ_{160°), измеренная для реакции $W(^{22}\text{Ne}, f)$ при энергии ионов 174 Мэв. Видно, что при изменении глубины тени χ_{160° в пределах от 0,1 до 0,45 разность $\Delta\chi$ остается неизменной в пределах статистической точности экспериментов.

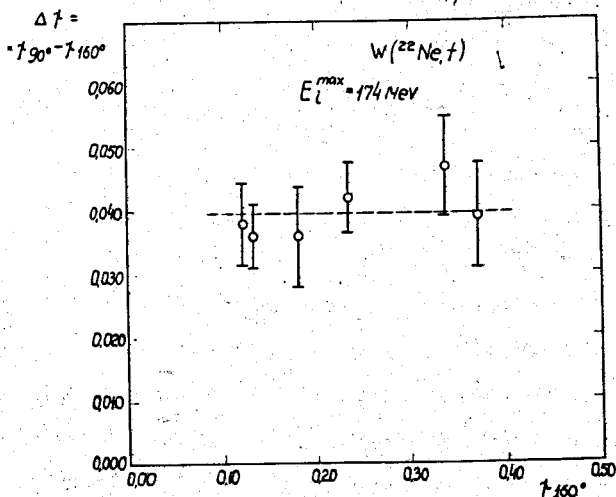


Рис. 3. Зависимость разности $\Delta\chi$ от параметра χ_{160° , характеризующего степень совершенства монокристалла, для реакции $W(^{22}\text{Ne}, f)$ при энергии ионов 174 Мэв.

Из этих опытов следует, что процедура вычитания методической составляющей тени является законной даже в том случае, если эта составляющая намного превышает физическую компоненту (см. рис. 3 - $\Delta\chi = 0,04$, $\chi_{160^\circ} = 0,4$).

Тем не менее работа с кристаллом низкого качества, дающим неглубокую тень, не выгодна, так как в этом случае для достижения той же точности результатов требуется значительно более высокая статистика, чем для кристалла, дающего глубокую тень. Нетрудно видеть, что относительная точность определения величины $\Delta\chi$ дается формулой

$$\frac{\delta\Delta\chi}{\Delta\chi} = \frac{\delta\chi_{90^\circ} + \delta\chi_{160^\circ}}{\chi_{90^\circ} - \chi_{160^\circ}}; \quad \delta\chi = \frac{b\delta a + \delta b}{b^2},$$

где

$$\chi = \frac{a}{b}, \quad \delta a = \sqrt{a}, \quad \delta b = \sqrt{b}.$$

χ_{90° и χ_{160° характеризуют глубину теней, наблюдаемых соответственно под углами 90° и 160° .

Влияние толщины мишени

При использовании толстой мишени работающий слой ее определяется полным пробегом осколков деления. Детекторы регистрируют при этом осколки деления сплошного энергетического спектра от максимальной энергии до энергии, соответствующей порогу регистрации осколков данным материалом. Бомбардирующие частицы, проходя эффективный слой мишени, теряют некоторую часть энергии. Поскольку сечение деления для многих реакций весьма резко зависит от энергии бомбардирующих частиц, то возникает некоторое распределение по глубине случаев деления. Это распределение, вообще говоря, существенно различается для разных реакций и может быть охарактеризовано разными средними значениями глубины вылета осколков. Для того чтобы уверенно сравнивать результаты измерения времен жизни для различных реакций, необходимо проверить, на-

сколько сильно влияет толщина эффективного слоя мишени на глубину теней χ_{90° , χ_{160° и на разницу глубин $\Delta\chi$. Кроме того экспериментальное выяснение этого вопроса может быть полезным для определения вклада вторичной тени в полную глубину тени и эффектов рассеяния частиц на дислокациях.

Опыт был поставлен следующим образом: перед стеклами, регистрировавшими осколки деления, располагались алюминиевые фольги различной толщины. Стекла могли зарегистрировать только осколки, имевшие после прохождения фольги достаточную энергию. Поэтому увеличение толщины фольги означало по-существу уменьшение толщины работающего слоя мишени. Эксперименты показали, что с увеличением толщины поглотителя перед детектором тень становится существенно более глубокой. На рис. 4 показана зависимость величин χ_{90° и χ_{160° от толщины поглотителя в относительных единицах, измеренная для двух участков монокристалла, имеющих различную степень совершенства. Из рисунка нетрудно видеть, что при существенном изменении каждой из величин χ_{90° и χ_{160° их разность $\Delta\chi$ остается практически постоянной с уменьшением толщины работающего слоя мишени. Этот факт позволяет считать разность $\Delta\chi$, измеренную для толстой мишени, физической величиной, пригодной для вычисления времени жизни составного ядра без введения каких-либо поправок.

Обсудим другие особенности зависимостей, представленных на рис.4. Факт углубления теней для более тонких мишеней может быть объяснен эффектами рассеяния продуктов реакции, выходящих из достаточно глубоких слоев. При этом существенным, по-видимому, является рассеяние на дислоцированных атомах. Последнее обстоятельство следует из того факта, что для более совершенного участка монокристалла углубление тени с увеличением толщины поглотителя является не таким резким, как для участка, дающего неглубокую тень при отсутствии поглотителя

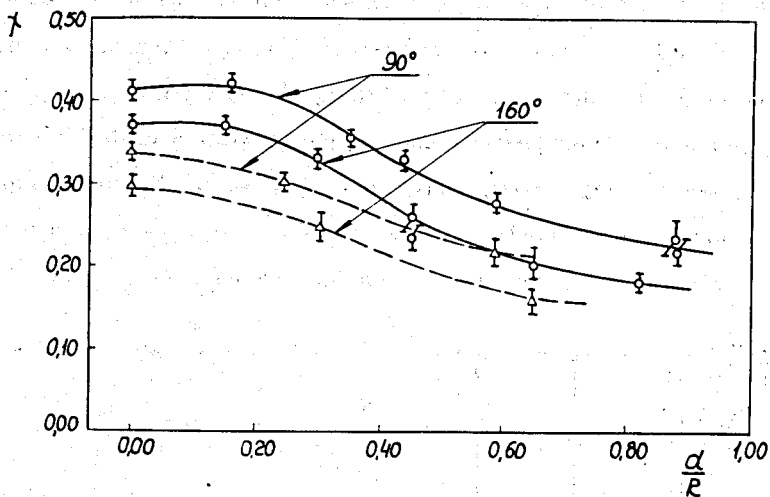


Рис. 4. Зависимость глубины теней χ_{90° и χ_{160° от толщины поглотителя, помещаемого перед детектором d . R — средний полный пробег осколков деления, за вычетом пробега, соответствующего энергии порога регистрации осколков.

(см. рис. 4). При значительной толщине поглотителя эти два участка дают тени, глубины которых близки друг к другу, в то время как при отсутствии поглотителя участки существенно отличаются по качеству.

При больших значениях толщины поглотителя зависимость χ от $\frac{d}{R}$ становится слабой. Это, по-видимому, означает, что при таких толщинах мишени эффекты рассеяния уже несут существенны, а основной вклад в выход осколков деления в направлении кристаллографической оси дают реакции на смещенных атомах (за счёт тепловых колебаний, повреждений и конечного времени жизни для $\theta = 90^\circ$).

Несколько странным кажется то обстоятельство, что в районе малых значений толщины поглотителя глубина тени слабо меняется с ростом

толщины, хотя при этом исключаются из регистрации низкоэнергетичные осколки деления, для которых эффекты рассеяния наиболее существенны.

Представляло интерес проследить также ход изменения угловой ширины теней с уменьшением толщины работающего слоя мишени. На рис. 5 показаны результаты, полученные в опытах. Угловая ширина тени остается почти постоянной с ростом толщины поглотителя, имеется тенденция к небольшому уменьшению угловой ширины на половине глубины.

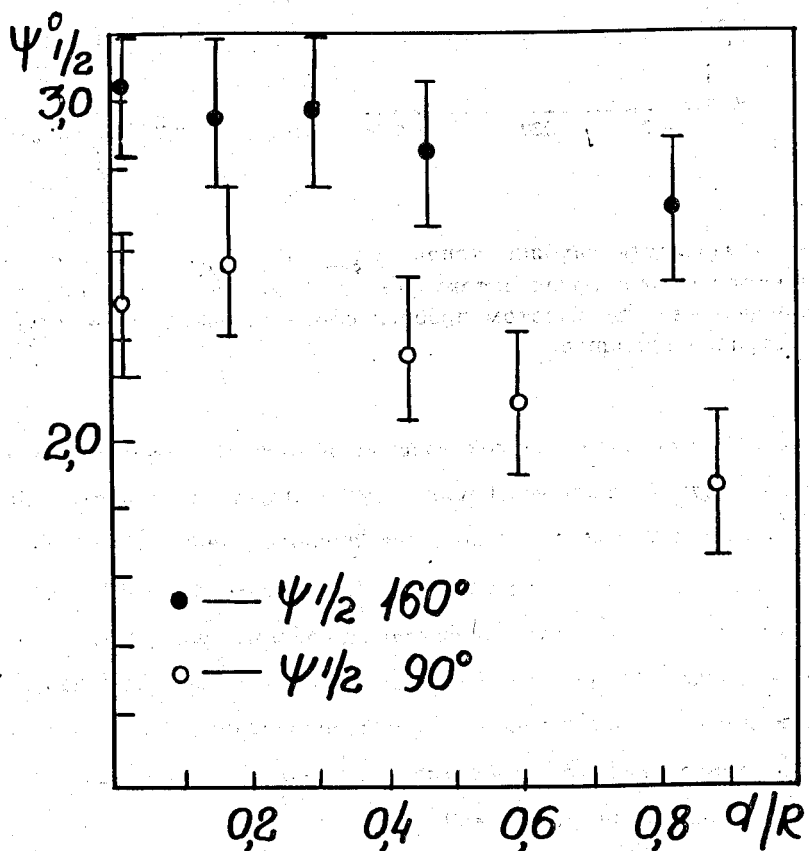


Рис. 5. Зависимость угловой ширины теней на половине глубины χ_{90° и χ_{160° от параметра d/R .

Изложенные здесь эксперименты позволяют сделать вывод, что применение толстой мишени не искажает существенно результат (величину $\Delta\chi$) по сравнению с данными, полученными для тонкой мишени.

Авторы благодарны академику Г.Н. Флерову за поддержку, полезные советы и постоянное внимание к работе, а также профессору А.Ф. Тулинову за ценное обсуждение и замечания.

Литература

1. А.Ф. Тулинов. ДАН СССР, 165, 546 (1965).
2. D.S.Gemell and R.E.Holland. Phys.Rev.Lett., 14, 945 (1965).
3. M.Maruyama et al. Nucl.Phys., A145, 58 (1970).
4. G.J.Clark et al. Nucl.Phys., A173, 73 (1971).
5. W.M.Gibson and K.O.Nielsen. Phys.Rev.Lett., 23, 114 (1970).
6. Yu.Melikov, Yu.D.Otstavnov, A.F.Tulinov, N.G.Chetchenin, Nucl.Phys., A180, 241 (1972).
7. С.А. Карамян, Ю.Ц. Оганесян, Ф. Нормуратов. ЯФ, 14, 499 (1971).
8. С.А. Карамян, Ф. Нормуратов, Ю.Ц. Оганесян, Сборник ОИЯИ, Д7-5769, Дубна, 1971.
9. А.Ф. Тулинов. УФН, 87 (4), 585 (1965).

Рукопись поступила в издательский отдел
18 февраля 1972 года.