

УДК 539.172.8

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ СЕЧЕНИЙ, УГЛОВЫХ И МАССОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСКОЛКОВ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ ГИГАНТСКОГО РЕЗОНАНСА

В.И. Касилов

ИФВЭЯФ ННЦ ХФТИ

ул. Академическая 1, г. Харьков, 61108, Украина,

E-mail: kasilovvi@kipt.kharkov.ua

Received 1 February 2012, accepted 20 February 2012

Предложена методика определения сечений электроделения тяжелых ядер в области энергий гигантского резонанса путем измерений отношения выхода фотоделения к сечению электроделения. Осколки деления регистрируются с помощью покровных стекол и майларовых пленок, нечувствительными к сопровождающему заряженному фону. Предложены также метод очистки электронного пучка от гамма-фона и метод измерения угловых и массовых распределений осколков деления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пучок электронов, деление ядер, камера деления, электро- и фотоделение ядер, отклоняющий магнит магнит, детектор осколков деления.

MEASUREMENT METHODIC OF THE CROSS-SECTIONS, ANGULAR AND MASS DISTRIBUTIONS OF THE DEBRIS AT ELECTROFISSION OF HEAVY NUCLEI IN THE REGION OF GIANT RESONANCE

V.I. Kasilov

Institute of High Energy and Nuclear Physics, National Science Centre of Physics and Technology

Akademicheskaya str.1, Kharkov, Ukraine, 61108

A methodic is proposed to obtain cross-sections of electrofission of heavy nuclei in the energy region of giant resonance using the experimental measurements of the ratio of the photofission yield to the electrofission cross-section. Fission fragments are registered using glass cover and mailar films which are insensitive to charged background accompanying the fragments. A method has been proposed for cleaning the electron beam from gamma-background as well as the method of angular and mass distribution measurement of fission fragments.

KEYWORDS: electron beam, nuclear fission, fission chamber, electro-and photofission of nuclei, the deflecting magnet, the detector of fission fragments.

МЕТОДИКА ВИМІРЮВАНЬ ПЕРЕРІЗІВ, КУТОВИХ ТА МАСОВИХ РОЗПОДІЛІВ УЛАМКІВ У ПРОЦЕСІ ЕЛЕКТРОПОДІЛУ ВАЖКИХ ЯДЕР В ОБЛАСТІ ЕНЕРГІЙ ГІГАНТСЬКОГО РЕЗОНАНСУ

В.І. Касілов

ІФВЕЯФ ННЦ ХФТИ

вул. Академічна 1, м. Харків, 61108, Україна

Запропоновано методику визначення перерізів електроподілу важких ядер в області енергій гігантського резонансу шляхом вимірювання відношення виходів фотоподілу до перерізів електроподілу. Уламки поділу реєструвались за допомогою покривного скла і майларових плівок, нечутливих до супроводжуючого уламки зарядженого фону. Запропоновано також метод очищення електронного пучка від гамма-фону та методи вимірів кутових і масових розподілів уламків поділу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: пучок електронів, поділ ядер, камера поділу, електро-і фотоподіл ядер, відхилаючий магніт, детектор уламків поділу.

Реакции электро-и фотоделения изучаются как с целью установления их механизма, так и для выяснения особенностей взаимодействия электронов (позитронов) и фотонов с ядрами. Электроны взаимодействуют с ядрами путем обмена виртуальными фотонами, поэтому электро- и фотоядерные процессы подчиняются очень близким закономерностям. Эти закономерности являются общими для большинства фотоядерных реакций и определяются, механизмом поглощения фотонов ядром.

Общая картина взаимодействия фотонов с ядрами наиболее детально изучена в области возбуждения гигантского электрического дипольного резонанса. Этому резонансу соответствует максимум в энергетической зависимости сечения поглощения фотонов, длина волны которых сравнима с размерами ядра и взаимодействие происходит с ядром как с целым. При таком поглощении все ядро принимает участие в дипольном колебании, которое состоит в движении протонов в направлении, противоположном движению нейтронов с фиксированной резонансной частотой.

Таким образом, в области энергий возбуждения гигантского дипольного резонанса в тяжелых ядрах процесс фотоделения конкурирует с другими способами распада возбужденного ядра (главным образом с испусканием нейтронов) и описывается моделью составного ядра, то есть сечение деления равно произведению сечения поглощения и относительной вероятности деления. Что же касается взаимодействия электронов (позитронов) с ядром, то к настоящему времени в этой области энергий имеется несколько работ, выполненных экспе-

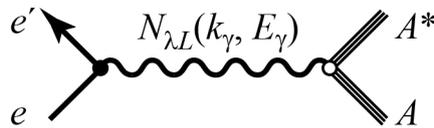
риментально. В области энергий гигантского дипольного резонанса детальные исследования сечения электроделения проводились в работах Аррудо Нето [1,2,] а позднее и в работе Строихера с соавторами [3]. Результаты этих экспериментов находятся в некотором противоречии с точки зрения определения вклада E2-резонанса в фото- и электроделение ядер ^{238}U . Имеются также экспериментальные данные о делении ядер электронами в интервале от 35 до 260 МэВ, полученные Ранюком Ю. Н. и Сорокиным П.В. [4] и данные о сечениях электроделения в области энергий от 20 до 120 МэВ, полученные Шоттером и др. [5,6]. Однако, вопрос о точности измерений абсолютных значений сечений электроделения остается и требуются новые эксперименты для изучения вклада E2- возбуждения в процесс электроделения. Поэтому исследование процессов электроделения в области «гигантского» резонанса на сегодня остается актуальным.

Целью настоящей работы является разработка экспериментальной методики для исследования фото- и электроделения тяжелых ядер в диапазоне энергий гигантского резонанса путем измерения отношения выходов фотоделения к сечению электроделения, методики измерения угловых и массовых распределений осколков деления на линейном ускорителе электронов при отсутствии на нем параллельного переноса пучка электронов.

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТО- И ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Основная сложность изучения фото- и электроядерных реакций заключается в том, что спектр тормозных и виртуальных фотонов является непрерывным, поэтому в измеряемый экспериментально выход реакций вносят вклад процессы, происходящие во всем диапазоне энергий – от порога до верхней границы спектра $[(E_e - m_e)]$, где E_e и m_e – полная энергия и масса покоя электрона].

Согласно методу виртуальных фотонов [6], взаимодействие электронов с ядром можно представить в виде простой диаграммы:



Гамильтониан взаимодействия кроме чисто электромагнитной вершины $[\hat{A}_\gamma(k_\gamma, E_\gamma)]$ – меллеровский потенциал для рассеиваемого электрона] включает в себя матричный элемент оператора тока $J_\gamma(k_\gamma, E_\gamma)$ для системы $A \rightarrow A^*$ в виде:

$$H(k_\gamma, E_\gamma) = \sum_{\gamma} \hat{A}_\gamma(k_\gamma, E_\gamma) J_\gamma(k_\gamma, E_\gamma), \quad (1)$$

где k_γ – переданный импульс, E_γ – переданная энергия.

Сечение электроделения σ_{ef} и выход фотоделения на эквивалентный γ -квант σ_{Qf} связаны с сечением фотоделения $\sigma_{\gamma f}$ следующими соотношениями:

$$\sigma_{ef}(E_e) = \sum_{\lambda L} \int_0^{E_e - m_e} N_{\lambda L}(E_e, E_\gamma) \sigma_{\gamma f}(E_\gamma) dE_\gamma / E_\gamma; \quad (2)$$

$$\sigma_{Qf}(E_e) = \sum_{\lambda L} \int_1^{E_e - m_e} N(E_e, E_\gamma) \sigma_{\gamma f}(E_\gamma) dE_\gamma / E_\gamma; \quad (3)$$

Здесь $N_{\lambda L}(E_e, E_\gamma)$ – спектр виртуальных фотонов, зависящий в общем случае от мультипольности взаимодействия L , а также от массы ядра и радиуса; λ – электрический или магнитный переход. Сечение представлено в виде разложения по мультиполям:

$$\sigma_{\gamma f}(E_\gamma) = \sum_{\lambda L} \sigma_{\lambda L}(E_\gamma). \quad (4)$$

Виртуальные фотоны имеют как поперечную, так и продольную поляризацию, поэтому суммирование в (2) для электрических мультиполей начинается с нуля, а не с единицы, как в (3) для фотонов.

Следует отметить, что при использовании тормозного γ -излучения спектр $N(E_e, E_\gamma)$ может быть измерен экспериментально. Этот спектр определяется условиями формирования фотонного пучка и не зависит от исследуемого ядра. Спектр же виртуальных фотонов определяется свойствами ядра-мишени и характером исследуемой реакции. Поэтому анализ результатов по электроделению, более информативных, чем данные по фотоделению, оказывается значительно более сложным.

С методической точки зрения использование электронов (виртуальные фотоны) имеет ряд определенных преимуществ по сравнению с реальными тормозными фотонами. При работе с пучком фотонов коллиматорами вырезается только часть тормозного излучения, образующегося в радиаторе. Вследствие зависимости сечения многократного рассеяния электронов от энергии, интенсивность и спектральный состав тормозного пучка, падающего на исследуемую мишень, могут существенно меняться с изменением энергии электронов и зависеть от качества проводки пучка в ускорителе. Облучение мишени непосредственно электронами позволяет иметь постоянный практически не зависящий от энергии электронов поток виртуальных фотонов. При использовании пучка электронов проще решаются вопросы фокусировки и мониторинга пучка.

Вместе с тем следует отметить, что сечение реакций под действием электронов примерно на два порядка ниже, чем сечение реакций под действием фотонов, поэтому к электронному пучку предъявляются более высокие требования в отношении различных фонов, главным образом γ -квантов и нейтронов. Формирование электронного пучка должно производиться таким образом, чтобы было сведено к минимуму сопутствующее γ -излучение, возникающее на коллиматорах, стенках камер и т. п. Для этого используется параллельный перенос электронного пучка, камера деления непосредственно соединяется с вакуумным электропроводом ускорителя. Кроме того, рассеяние электронов на мишени приводит к значительным радиационным фонам, затрудняющим работу детектирующей аппаратуры.

В настоящей работе эксперимент проводится при отсутствии параллельного переноса пучка, на отклоненном пучке электронов на угол 35° относительно оси ускорителя, и выведенном через разделительную титановую фольгу толщиной 50 мкм в атмосферу. Естественно в таком случае выведенный электронный пучок с регулируемой энергией от 5 до 30 МэВ будет сопровождаться тормозными γ -квантами, образующимися на выходной фольге.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ОТНОШЕНИЯ ВЫХОДОВ ФОТОДЕЛЕНИЯ К СЕЧЕНИЮ ЭЛЕКТРОДЕЛЕНИЯ

Пучок электронов, регулируемый по энергии в интервале от 5 до 30 МэВ, и имеющий энергетический разброс $1 \div 3\%$, выводится через титановую фольгу толщиной 50 мкм в атмосферу. При этом выведенный пучок электронов будет сопровождаться тормозным излучением γ -квантов, образующихся в фольге. Интенсивность этого излучения будет составлять $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ эквивалентных γ -квантов на один падающий электрон. Для очистки пучка электронов от сопровождающего его фона тормозного γ -излучения нами был установлен отклоняющий магнит (рис. 1).

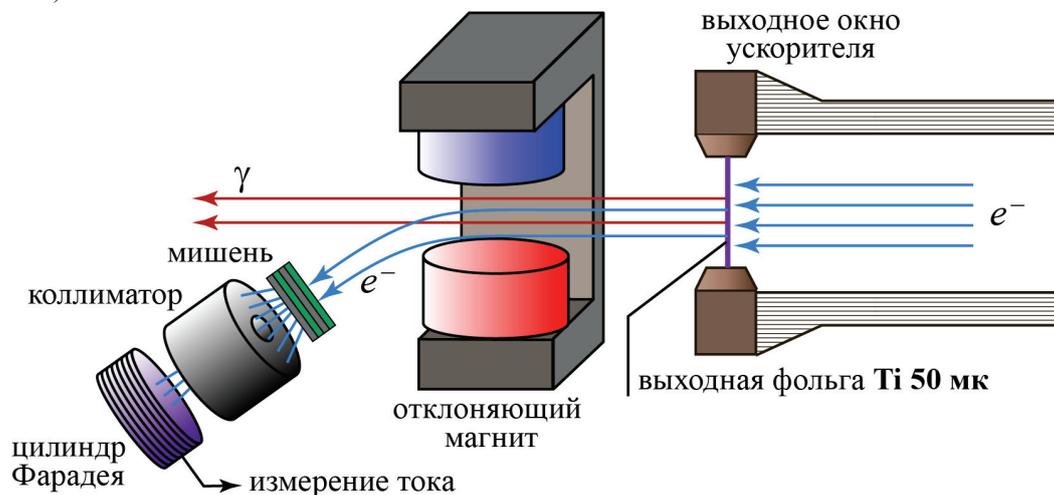


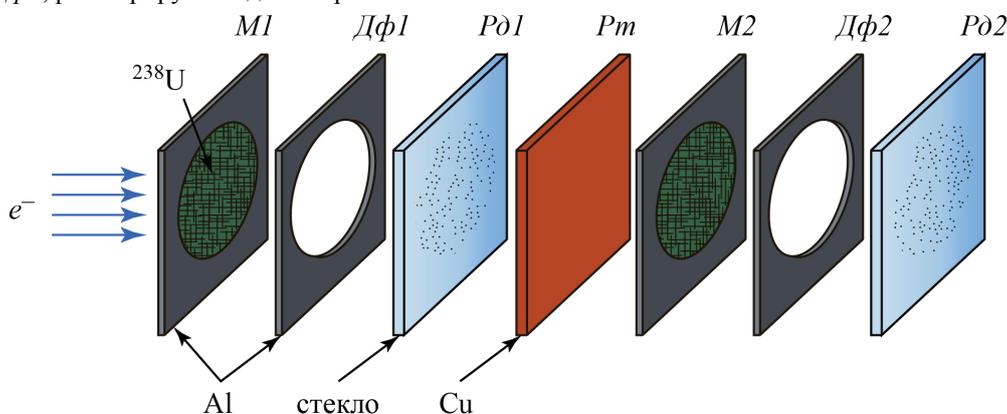
Рис. 1. Очистка электронного пучка от сопутствующего γ -фона.

На очищенном электронном пучке устанавливается стопка, из двух урановых мишеней одинаковой толщины, разделенных радиатором тормозного излучения, толщина которого составляет $\sim 0,007$ рад. длины.

Урановые мишени нанесены на алюминиевую подложку толщиной 50 мкм. Толщина нанесенного слоя ^{238}U составляет $3 \cdot 10^{18}$ яд./см². Осколки деления регистрируются с помощью стеклянных твердотельных детекторов, либо майларовых пленок, нечувствительных к сопровождающему осколку заряженному фону, состоящему из электронов, позитронов, протонов, альфа-частиц и т.д. За каждой мишенью устанавливаются диафрагмы одинакового размера, через которые осколки деления попадают на стеклянный детектор. Схема расположения мишеней, диафрагм, радиатора тормозного излучения и детекторов осколков деления показана на рис. 2. После них, устанавливается коллиматор с отверстием равным диаметру диафрагм. Прошедшие через коллиматор электроны регистрируются цилиндром Фарадея.

Пучок электронов попадает на первую мишень $^{238}\text{U} M1$, где происходит процесс электроделения. Образовавшиеся осколки деления через диафрагму $D\phi 1$ попадают на регистрирующий детектор $P\partial 1$. Далее пучок

электронов попадает на радиатор тормозного излучения Pm , где образуется поток γ -квантов, который вместе с прошедшим пучком электронов попадает на вторую урановую мишень $M2$, где происходит процесс деления ядер как электронами, так и γ -квантами. Образовавшиеся осколки деления во второй мишени, пройдя через диафрагму $Дф2$, регистрируются детектором $P\delta2$.



$M1, M2$ – урановые мишени;
 $Дф1, Дф2$ – диафрагмы;
 Pm – радиатор тормозных фотонов;
 $P\delta1, P\delta2$ – твердотельные регистрирующие детекторы.

Рис. 2. Конструкция мишени

Следует отметить, что тормозное излучение возникает не только в радиаторе, но и в подложке урановой мишени, в самой урановой мишени и в стеклянном или майларовом детекторе. Поток γ -квантов, попадающий на вторую урановую мишень, представляет сумму потоков от всех перечисленных источников.

Таким образом, выход любой реакции, в том числе и деления ядер из мишени, бомбардируемой электронами, можно представить суммой вкладов фото- и электроядерной реакции [4]:

$$Y(E_e, \Delta t) = \sigma_e(E_e) + \sigma_Q(E_e)\Delta t, \quad (4)$$

где Δt – тормозной путь электрона, выраженный в радиационных длинах.

Обычно вклады фото- и электроядерной реакции разделяются при измерении выхода реакции в зависимости от толщины радиатора. В простейшем случае достаточно двух измерений – одно с радиатором, другое без него.

Тогда

$$\frac{\sigma_Q}{\sigma_e} = \frac{Y_1 - Y_2}{\Delta t Y_2}, \quad (5)$$

где Y_1 и Y_2 – выходы реакции с радиатором и без него соответственно. В соотношении (5) для простоты пренебрегают толщиной делящейся мишени, которая обычно бывает мала в экспериментах, так как пробег осколков не превышает 0,01% радиационной длины.

После облучения исследуемой мишени пучком γ -квантов или электронов твердотельные детекторы удаляются из стопки и протравливаются в плавиковой кислоте, если это были стекла, или в щелочи, если это были майларовые пленки, в результате чего проявляются треки осколков деления. После травления твердотельные детекторы просматриваются под микроскопом и определяется количество образовавшихся треков. Затем по формуле (5) определяется отношение σ_Q/σ_e .

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ И МАССОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ

Измерение угловых распределений осколков фото- и электроделения позволяет выделить мультипольную структуру процесса. Вблизи порога деления мультипольная структура определяется в основном (электрическим $E1$ и магнитным $M1$), и в значительно меньшей степени, квадрупольными ($E2$ и $M2$) переходами.

Измерение распределений масс и кинетических энергий осколков дает наиболее детальную информацию о механизме деления. В отношении фото- и электроделения это означает прежде всего возможность ответа на вопрос о соотношении $E1$ - и $E2$ -возбуждений в ядрах.

В настоящем эксперименте измерение угловых и массовых распределений осколков деления проводится по схеме, показанной на рис.3.

Пучок электронов, выведенный из ускорителя, попадает через коллиматор с отверстием диаметром 5 мм в

вакуумную камеру. За коллиматором располагался магнит, который отклоняет пучок электронов с оси коллиматора на определенный угол, позволяющий очистить электронный пучок от сопровождающего фона гамма-квантов, образовавшегося на фольге входного окна вакуумной камеры и апертуре коллиматора. На отклоненном пучке электронов устанавливается камера деления с расположенными в ней урановыми мишенями и детекторами осколков деления. Камера деления представляет собой цилиндр диаметром 120 мм, в центре которого располагаются мишени, а между ними медный радиатор тормозного излучения толщиной 0,007 рад. длины. Такая стопка из двух мишеней и радиатора между ними устанавливается так, чтобы она была ориентирована под углом 45 градусов к направлению падающего пучка электронов.

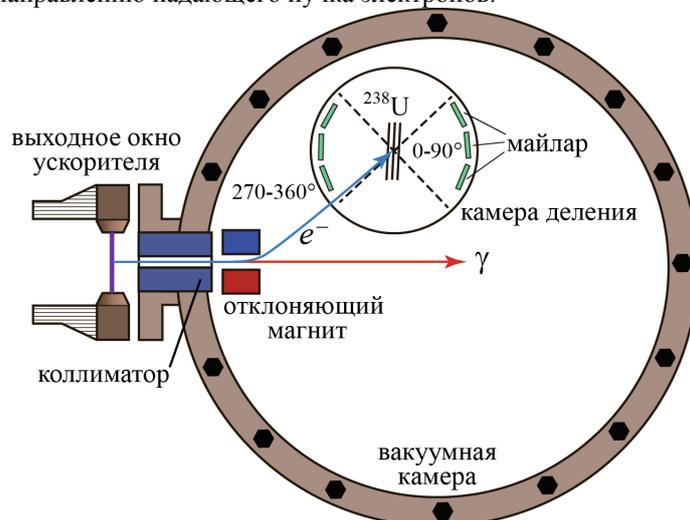


Рис. 3. Схема установки для измерения угловых и массовых распределений осколков деления ^{238}U .

Детекторы осколков деления располагаются под углами от 0 до 90 градусов и под углами от 270 до 360 градусов к направлению падающего пучка электронов по окружности камеры деления. В качестве детекторов осколков деления используется майларовая пленка, нечувствительная к заряженному фону, сопровождающему вылетающие из мишени осколки деления. Кроме того, майларовая пленка располагается таким образом, чтобы осколки деления внедрялись в нее под углом 20 градусов. При этих условиях после травления образовавшийся трек становится виден под микроскопом и можно измерить его длину и толщину.

Для того чтобы угол внедрения осколков в майларовую пленку имел небольшой разброс, между мишенью и майларовой пленкой устанавливалась металлическая сетка с размером ячейки равной 0,1 мм. Эта сетка выполняла роль коллиматора для осколков деления, что обеспечивало расходимость пучка осколков деления, падающего на майларовую пленку, равную 3 миллирадианам.

После облучения с заданной экспозицией, обеспечивающей необходимую статистику в числе образовавшихся треков от осколков деления в майларовой пленке (порядка 1 процента), пленка удаляется из камеры деления. После травления пленки в щелочи КОН она просматривается под микроскопом для определения количества треков, их длины и толщины (диаметра), что позволяет определить кинетическую энергию и массу осколка, образовавшего трек. После такой процедуры производится обработка экспериментальных данных, а затем строятся угловые и массовые распределения осколков деления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана экспериментальная методика определения сечений электроделения путем измерения отношения выхода продуктов реакции фотоделения к сечению электроделения, измерения угловых и массовых распределений осколков деления. Эта методика отличается возможностью ее применения на линейных ускорителях электронов без параллельного переноса пучка электронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arruda Neto J.D.T., Herdade S.B, Berman B.L. et.al. E2 giant resonance and an M1 component in the photofission of ^{238}U // Phys. Rev. C. – 1980. – Vol.22, № 5. - P.1996-2003.
2. Arruda Neto J.D.T., Berman B.L. Study of electrofission and hadron induced fission decay of the giant quadruple resonance of ^{238}U // Nucl. Phys. A. – 1980. – Vol.342, № 2. – P.483-489.
3. Aschenbach J., Haag R.et al. Electrofission of ^{238}U and ^{232}Th // Z.Phys. A. - 1979 - 292, № 3 - P.285-292.
4. Ранюк Ю.Н., Сорокин П.В. Деление ядер электронами в интервале от 35 до 260 МэВ // ЯФ. – 1967. – Т.5, №1. - С. 37-41.
5. Shotter A.C. The E1 and E2 strength in electrofission of some heavy elements // Nucl. Phys. A. – 1977. – Vol. 290, №1. - P. 55-57.
6. Stroehel H., Fisher R.D., Drezler J. et al. Absolute cross-sections for electron and positron induced fission of ^{238}U and test of DWBA virtual photon spectra // Nucl. Phys. A. - 1982. – Vol.378, №1. - P.237-242.