

Поиск эмиссии π^0 -мезонов при вынужденном делении ^{235}U нейтронами

В. А. Варлачев, Г. Н. Дудкин¹⁾, Ю. Ф. Кречетов, В. Н. Падалко, Е. Н. Шувалов

НИИ ядерной физики Томского политехнического университета, 634050 Томск, Россия

Поступила в редакцию 23 июня 2004 г.

На ядерном реакторе выполнен эксперимент по поиску эмиссии нейтральных пионов при вынужденном делении ядер ^{235}U -нейтронами. Для этого разработана и создана экспериментальная установка для поиска эмиссии π^0 -мезонов с высокой обнаружительной способностью к этому процессу. Установка состоит из двух черенковских спектрометров полного поглощения для регистрации и измерения энергии двух γ -квантов от распада π^0 -мезона. Спектрометры располагались на выходах двух соосных горизонтальных экспериментальных каналов. Для защиты детекторов от β - , γ -частиц низких энергий и нейтронных потоков в каналах размещены фильтры из воды длиной 3.5 м. Для режекции космического фона над каждым спектрометром помещены сцинтилляционные счетчики большой площади, работающие в режиме антисовпадений. Энергетическое и временное разрешения спектрометров, эффективность регистрации заряженных частиц сцинтилляционными счетчиками исследованы на вторичном электронном пучке Томского электронного синхротрона “СИРИУС”. Сеансы измерений эффекта на работающем реакторе (продолжительностью 805 ч) чередовались с сеансами измерений фона на неработающем реакторе (продолжительностью 403 ч). В результате статистической обработки результатов эксперимента установлено ограничение на вероятность эмиссии нейтральных пионов при вынужденном делении ядер урана-235 нейтронами, равное $\leq 5.3 \cdot 10^{-12}$, при уровне достоверности 90%. Исходя из этого результата и сравнения с результатами других работ, выполненных на источниках спонтанно делящихся ядер ^{252}Cf , можно сделать вывод о том, что процессы спонтанного деления и вынужденного, под действием нейтронов спектра деления, не отличаются с точки зрения вероятности эмиссии π^0 -мезонов.

PACS: 25.85.Ec

Известно, что при делении тяжелых ядер ($Z > 92$), выделяется энергия ~ 200 МэВ, которой достаточно для образования π^0 -мезона. Законами сохранения энергии- импульса этот процесс не запрещен. Однако в рамках традиционных моделей он подавлен барьерными эффектами и имеет исчезающе малую вероятность [1].

В цикле теоретических работ (обзор в [2]) предложено, в рамках статистической модели ядра, рассматривать тяжелые ядра ($Z > 92$) как горячую сферу с примесью релятивистского газа пионов, имеющего бозе-эйнштейновское энергетическое распределение. В рамках этой модели были вычислены вероятности эмиссии нейтральных пионов – P_m/P_f (выход пионов на один акт деления) при спонтанном делении ряда ядер. Было показано, что вероятность “пионной радиоактивности” очень сильно зависит от закладываемых в модель параметров, таких как энергия возбуждения ядра и связанная с ней ядерная температура. Например, для спонтанно делящегося ядра ^{252}Cf вероятность “пионной радиоактивности” меняется от $1.8 \cdot 10^{-14}$ до $7.3 \cdot 10^{-7}$ при изменении ядерной

температуры в пределах $1.3 \div 1.6$ МэВ. После появления цикла теоретических работ [2] был выполнен ряд экспериментов по поиску “пионной радиоактивности” при делении ядер с использованием источников спонтанно делящихся ядер ^{252}Cf . При 90%-м уровне достоверности были установлены следующие верхние пределы P_m/P_f на эмиссию π^0 -мезонов: $< 5 \cdot 10^{-9}$ [3]; $< 1 \cdot 10^{-9}$ [4]; $< 3.3 \cdot 10^{-10}$ [5]; $< 1.4 \cdot 10^{-11}$ [1].

Известно, что процессы спонтанного деления ядер и вынужденного под действием нейтронов значительно отличаются, так как в последнем случае ядро делится через промежуточное высоковозбужденное состояние. Это может повлиять на вероятность эмиссии пионов или других частиц высоких энергий при вынужденном делении ядер. Так в работе [6] предполагается, что вероятность эмиссии π -мезонов при вынужденном делении может быть на много порядков выше, чем при спонтанном делении. В этой теоретической работе предложено исследовать π -канал деления ядер (деление сопровождающееся испусканием пионов) протонами при энергиях ниже порога образования π -мезонов на ядрах. Авторы, в рамках разработанной ими каскадно-испарительно-делительной модели, выполнили расчеты полных сечений, угло-

¹⁾e-mail: dudkin@npi.tpu.ru

вых и дифференциальных распределений пионов и показали, что даже в подпороговой области сечение π -канала достаточно большое. Предполагается создание экспериментальной установки для поиска π -деления на протонном пучке Московской мезонной фабрики.

На импульсном ядерном реакторе ОИЯИ (Дубна) была сделана попытка обнаружения выхода γ -квантов большой энергии (> 30 МэВ) при вынужденном делении ядер ^{252}Cf и ^{235}U [7]. Однако в эксперименте было установлено относительно слабое ограничение на вероятность эмиссии γ -квантов большой энергии – $P_\gamma/P_f \leq 3 \cdot 10^{-8}$. Между тем обнаружение редких процессов, возникающих при делении обычных ядер, либо установление более сильного ограничения на вероятность существования таких процессов важно с точки зрения расширения наших знаний о строении ядерной материи и механизме деления ядер. Поэтому основной задачей настоящей работы был поиск эмиссии π^0 -мезонов при вынужденном делении ядер ^{235}U нейтронами на установке с высокой обнаружительной способностью к указанному процессу.

При разработке проекта эксперимента предполагалось, что наиболее вероятным процессом будет процесс эмиссии π^0 -мезонов с близкой к нулю кинетической энергией. В этом случае угол разлета между γ -квантами будет близок к 180° , а их энергия $E_\gamma = 67.5$ МэВ. Основой экспериментальной установки являются два черенковских спектрометра полного поглощения (ЧСПП) [8] для регистрации в совпадении и измерения энергии двух γ -квантов от распада π^0 -мезонов, расположенные на выходах горизонтальных экспериментальных каналов ядерного реактора НИИ ядерной физики при ТПУ с максимальной мощностью 6 МВт. Оси каналов пересекаются под углом $177.3^\circ \pm 1.2^\circ$ вблизи от центра активной зоны реактора. Расстояние между спектрометрами составляет 9.5 м. Для режекции космического фона над каждым спектрометром помещены сцинтилляционные счетчики большой площади [9]. Эффективность регистрации заряженных частиц сцинтилляционными счетчиками, измеренная с помощью мюонов космического излучения, равна 0.97. Для защиты ЧСПП от β -, γ -частиц низких энергий и нейтронных потоков из активной зоны реактора в каналах размещены водяные фильтры длиной 350 см. Измерения показали, что на выходах из каналов существуют следующие фоновые условия: мощность экспозиционной дозы γ -излучения 30 мкР/с, плотность потока быстрых и тепловых нейтронов < 1 нейтрон/см²·с. Анодный ток фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) черенковских спектрометров при этом был равен 1.4 мкА. Для имитации фоновой загрузки при измерениях с нера-

ботающим реактором в ЧСПП смонтированы светодиоды, позволяющие создавать постоянный уровень подсвета фотоумножителей. Энергетическая и временная калибровки ЧСПП были выполнены на вторичном моноэнергетическом электронном пучке синхротрона СИРИУС при энергиях 41, 66 и 97 МэВ. Так как фоновое излучение из активной зоны реактора ухудшает энергетическое и временное разрешения спектрометров, то их калибровка проводилась при однофотонном под свете фотокатодов ФЭУ на уровне анодного тока 2 мкА. Амплитудное разрешение обоих спектрометров при энергии 66 МэВ равно 20%, временное разрешение составляет 2.0 нс (приведены среднеквадратичные отклонения). Сигналы с черенковских детекторов и сцинтилляционных счетчиков после усиления поступали на формирователи импульсов и далее в программируемую схему отбора событий, выполняющую функцию аппаратного триггера. Схема формирует сигнал "Start", если во временном интервале ($\tau = \pm 50$ нс) происходит совпадение сигналов с ЧСПП при отсутствии сигналов со сцинтилляционных счетчиков. Амплитуды сигналов с ЧСПП и сцинтилляционных детекторов регистрировались заряд-цифровым преобразователем. Временной интервал между сигналами с ЧСПП преобразовывался в код временным кодировщиком. Система мониторинга выполнена на основе программируемого генератора и высокостабильных карбид-кремниевых светодиодов, размещенных в каждом детекторе [10]. Дополнительный независимый сквозной контроль за стабильностью амплитудных траектов и оптической части ЧСПП осуществлялся с помощью периодических измерений положения максимума амплитудного распределения импульсов от космического излучения.

Измерения были выполнены в течении 2002–2003 гг. Сеансы измерений на работающем реакторе чередовались с сеансами измерений радиационного и космического фонов при неработающем реакторе. Для того чтобы условия фоновых измерений не менялись, ФЭУ черенковских спектрометров подсвечивались от светодиодов постоянного тока с таким уровнем подсветки, который обеспечивал примерно такой же темп счета с формирователей импульсов черенковских спектрометров, как и при работающем реакторе. На рис.1 приведены результаты сеансов измерений радиационного и космического фонов при неработающем реакторе общей продолжительностью 403 ч. Кругом отмечена область энергий γ -квантов от ожидаемых событий распада π^0 -мезонов с достоверной вероятностью 0.9 в приближении двумерного гауссовского распределения со средним $E_{\gamma_{1,2}} = 67.5$ МэВ и $\sigma_{\gamma_{1,2}} = 13.5$ МэВ. Кроме того, дополни-

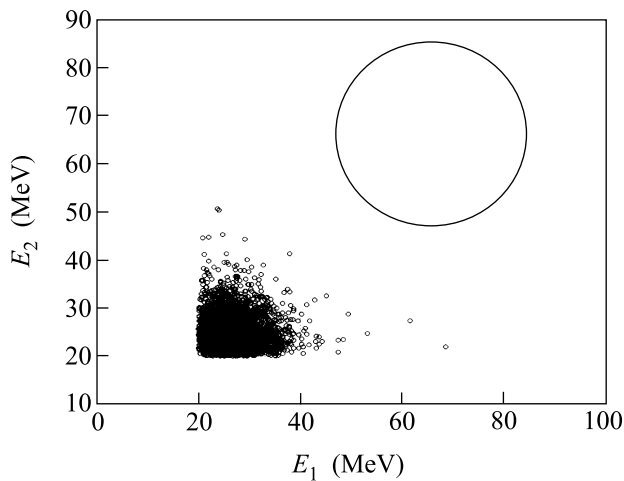


Рис.1. Распределение событий в двухмерной энергетической области (реактор не работает)

тельная селекция осуществлялась путем отбора импульсов с ЧСПШ во временном интервале ± 6 нс. На рис.2 приведены результаты сеансов измерений эффекта на работающем реакторе при общей продолжи-

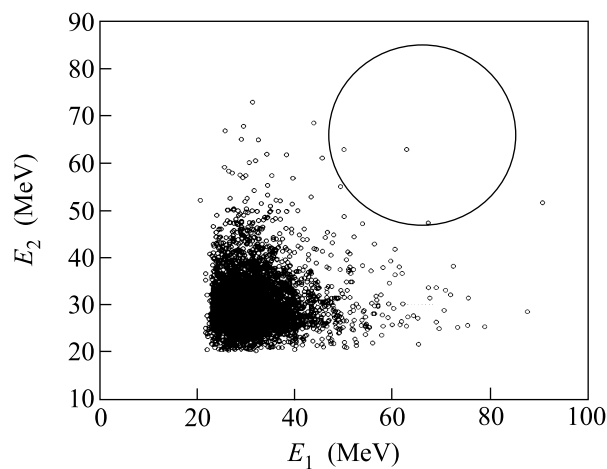


Рис.2. Распределение событий в двухмерной энергетической области (реактор работает)

тельности набора статистики 805 ч. Видно, что в выделенную область регистрации π^0 -мезонов попало 3 события. Обращает на себя внимание то, что энергетический спектр γ -квантов, выходящих из активной зоны реактора, имеет достаточно жесткий характер, и события, попавшие в выделенную область, вполне могут быть обусловлены случайными совпадениями. Поэтому полученные результаты позволяют установить только верхний предел на вероятность эмиссии π^0 -мезонов при вынужденном делении ядер ^{235}U нейтронами:

$$\frac{P_m}{P_f} \leq \frac{4\pi n}{GT\Omega k_1 k_2}, \quad (1)$$

где $G = 5.3 \cdot 10^{15}$ дел./с – расчетная интенсивность деления ядер в просматриваемой через соосные каналы части активной зоны реактора; $T = 2.89 \cdot 10^6$ с – время измерения эффекта; $\Omega = 3.3 \cdot 10^{-4}$ ср – расчетный эффективный телесный угол регистрации π^0 -мезона, полученный в предположении, что π^0 -мезоны образуются с близкой к нулю кинетической энергией; $k_1 = 2.2 \cdot 10^{-6}$ – расчетный коэффициент, учитывающий поглощение γ -квантов от распада π^0 -мезона в веществе активной зоны реактора и в водяных фильтрах; $k_2 = 0.9$ – коэффициент, учитывающий потерю событий при обрезании области регистрации π^0 -мезонов по энергии; $n < 4.2$ – верхний предел на число зарегистрированных π^0 -мезонов при уровне достоверности 90%, полученный в результате статистического анализа данных, базирующегося на статистике Пуассона [11] (зарегистрировано 3 события, фон – 3 события). В результате получим $P_m/P_f \leq 5.3 \cdot 10^{-12}$ при уровне достоверности 90%. Исходя из этого результата, можно сделать вывод, что процессы спонтанного деления и вынужденного, под действием нейтронов спектра деления, не отличаются с точки зрения вероятности эмиссии π^0 -мезонов.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Е. С. Солодовникову за полезные обсуждения, И. Н. Григорову, В. М. Левицкому и В. И. Манацкову за помощь при создании установки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант # 02-02-17803а.

1. J. N. Knudson, C. L. Morris, J. D. Bowman et al., *Phys. Rev.* **C47**, 2869 (1991).
2. D. B. Ion, R. Ion-Mihai, M. L. Ion, and A. I. Sandru, *Spontaneous pion emission during fission a new nuclear radioactivity*, e-print arXiv:nucl-th/0310056 v.1, 2003.
3. C. Cerruti, J. M. Hisleur, and J. Julien, *Z. Phys.* **A329**, 383 (1988).
4. J. R. Beene, C. E. Bemis, and M. L. Halbert, *Phys. Rev.* **C38**, 569 (1988).
5. S. Stanislaus, D. S. Armstrong, and D. F. Measday, *Phys. Rev.* **C39**, 295 (1989).
6. А. С. Ильинов, М. В. Мебель, *ЯФ*, **64**, 1463 (2001).
7. В. Г. Николенко, А. Б. Попов, Г. С. Самосват, Хван Чер Гу, *Письма в ЖЭТФ* **27**, 65 (1978).
8. Г. Н. Дудкин, В. Н. Епонешников, Ю. Ф. Кречетов, *ПТЭ* **2**, 64 (1973).
9. Ю. В. Васильченко, А. Н. Гулида, Г. Н. Дудкин, В. Н. Падалко, *ПТЭ* **2**, 36 (1998).
10. С. В. Брянский, В. Н. Падалко, *ПТЭ* **1**, 82 (1995).
11. *Review of Particle Physics. Statistics*, *Phys. Rev.* **D54**, 166 (1996).