

УДК 539.1.05, 539.123

ИЗМЕРЕНИЕ В ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ С МОЛИБДЕНОВЫМ НАПОЛНЕНИЕМ СОБЫТИЙ, ИМИТИРУЮЩИХ 2β -РАСПАД

В. Д. Ашитков¹, А. С. Барабаш¹, В. Я. Браднова², В. А. Дитлов¹,
В. В. Дубинина¹, Н. П. Егоренкова¹, С. И. Коновалов¹, Е. А. Пожарова¹,
Н. Г. Полухина³, В. А. Смирнитский¹, Н. И. Старков³, М. М. Чернявский³,
Т. В. Щедрина³, В. И. Юматов¹

Исследование возможности безнейтринного двойного бета-распада проводится в фотоэмульсионном эксперименте с изотопом Mo-100. Приведены результаты измерения позитрон-ядерных столкновений с целью оценки фоновых событий, имитирующих 2β -распад в области ядерной фотоэмульсии, примыкающей к молибденовым конгломератам.

Ключевые слова: нейтрино, ядерная фотоэмульсия, распознавание образов.

Ядерная фотоэмульсия, как детектор электронов, возникающих при 2β -распаде, использовалась в ряде экспериментов [1, 2]. В работах [2] приведен результат эмульсионного эксперимента по поиску 2β -распада ^{96}Zr , в котором было получено лучшее в то время ограничение на $2\nu 2\beta$ -распад ^{96}Zr . В работе [3] обсуждается возможность использования для регистрации 2β -распада эмульсионных камер, прослоенных пластиком с нанесенным на нём источником 2β -распада. Нами был предложен эксперимент [4], в котором предполагалось использовать для наблюдения 2β -распада ядерную эмульсию с молибденовым (^{100}Mo) наполнением. Основным достоинством такой методики изучения

¹ Институт теоретической и экспериментальной физики («ФГУП ГНЦ РФ – ИТЭФ»), Россия, 117218, Москва, ул. Большая Черемушkinsкая, 25.

² Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Дубна, Московская область, ул. Жолио–Кюри 6.

³ Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: polukhina@sci.lebedev.ru.

2β -распада является визуализация событий и возможность измерения всех характеристик распада: суммарной и отдельной энергии электронов и углов их разлета.

Энергия электронов определяется по их пробегу от места вылета из конгломерата Мо до полной остановки, которая имеет в эмульсии, в конце пробега, характерный вид. В нашем опыте мелкодисперсный порошок (Мо, 2–4 мкм) перемешивался с ядерной фотоэмульсией в процессе её изготовления. Подробности предварительных испытаний и оценки ожидаемых результатов использования ядерных фотоэмульсий с ^{100}Mo наложением опубликованы в работе [4].

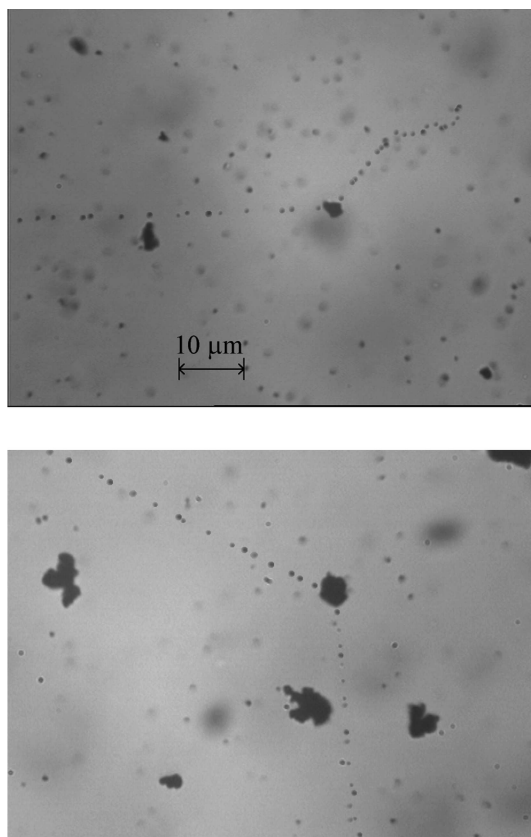


Рис. 1: Имитация вылета двух электронов, расположенных в фокальной плоскости объектива, из конгломерата Мо.

В настоящей работе приведены результаты оценки возможности исключения некоторых фонов, имитирующих 2β -распад в конфигурации эксперимента, предложенного в [4]. На рис. 1 показана реальная фотография в ядерной фотоэмульсии конгломератов (слипшиеся зерна) мелкозернистого порошка из промышленного Мо и имитация вылета из Мо двух электронов различной энергии. В том случае, если эти два электрона вы-

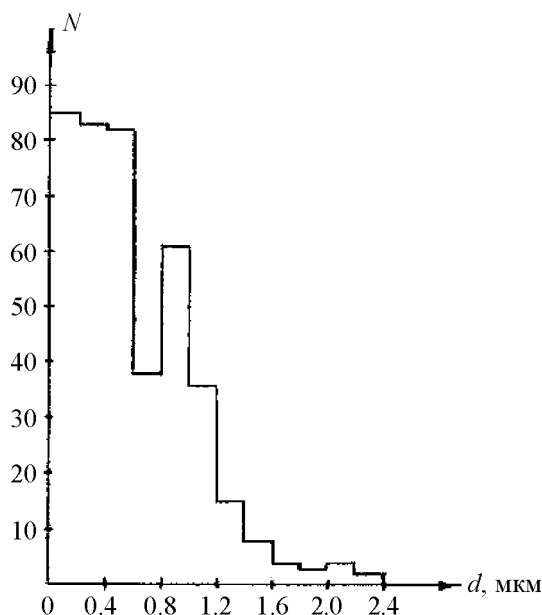


Рис. 2: Распределение минимального расстояния d между двумя треками, образованными частицами, вылетающими из точки столкновения позитрона с ядром фотоэмульсии.

летают в результате 2β -распада ядра ^{100}Mo , то они должны вылетать из одной точки. Может быть несколько других причин, по которым возможно наблюдение вылета двух электронов:

- Т.к. предполагается длительная экспозиция эмульсионных камер с ^{100}Mo , а ядерная фотоэмульсия не имеет временного разрешения, то последовательный, не одновременный вылет двух электронов из конгломерата, будет зарегистрирован как кандидат в 2β -распад ^{100}Mo .

- Такими событиями могут быть β -распады различных изотопов, присутствующих в Mo в виде примесей, в случае недостаточной очистки ^{100}Mo и β -распад ^{40}K ($T_{1/2} = 1.28 \times 10^9$ лет; $E_\beta = 1.312$ МэВ), который присутствует в желатине вблизи конгломерата. Конечная точка β -спектра при распаде ^{40}K составляет 1.31 МэВ. Т.о. максимальная энергия двух β -электронов (от двух разных распадов ^{40}K) может достигать 2.62 МэВ, в то время как для ^{100}Mo она равна 3 МэВ. При не очень хорошем энергетическом разрешении такие события с некоторой (малой) вероятностью могут имитировать события от безнейтринного двойного β -распада ^{100}Mo .

- Фоновые события могут возникнуть при распаде ^{90}Sr вблизи конгломерата Mo.

Стронций распадается на иттрий ${}^{90}\text{Sr}_{38} \rightarrow {}^{90}\text{Y}_{39} + e^- + \bar{\nu}_e$ ($T_{1/2} = 28.8$ лет; $E_\beta = 0.549$ МэВ), который, в свою очередь, быстро распадается на цирконий (стабильный) ${}^{90}\text{Y}_{39} \rightarrow {}^{90}\text{Zr}_{40} + e^- + \bar{\nu}_e$ ($E_\beta = 2.28$ МэВ). Эта цепочка двух последовательных распадов будет выглядеть в эмульсии как 2β -распад. Максимально возможная энергия двух электронов этой цепочки равна 2.829 МэВ. В случае недостаточного энергетического разрешения такие события могут стать фоновыми для исследуемого эффекта.

Для того чтобы оценить возможность исключения событий, имитирующих 2β -распад, мы использовали позитрон-ядерные взаимодействия, в которых возникают релятивистские частицы, вылетающие с различными углами из точки столкновения. В этих измерениях произвольно отбирались пары релятивистских частиц, с углом φ между ними, и определялось, насколько точно они пересекаются в районе вершины взаимодействия. Для вычисления использовались пространственные координаты двух зерен эмульсии на каждом следе: ближайшие к вершине взаимодействия и затем последующие, вплоть до четвертого зерна. Длина измерительной базы для электронов ограничена из-за их низкой энергии и, как следствие этого, сильного рассеяния. Влияние рассеяния на точность определения пересечения треков электронов оценивается по данным работы [5]. Ошибки в измерении координат зерен на следах частиц и рассеяние приводят к тому, что прямые, проведенные по этим точкам, не пересекаются, а являются скрещивающимися прямыми. Поэтому для определения “точки пересечения” используется минимальное расстояние между этими прямыми. На рис. 2 показано распределение величин d . Среднее значение $\langle d \rangle = (0.60 \pm 0.03)$ мкм и неопределенность пространственного положения точки пересечения не превышает размеров конгломерата, а 80% значений d сосредоточено в области ~ 1 мкм относительно точки столкновения. На рис. 3 показана зависимость d от угла φ . Как видно из этих данных (рис. 2 и 3) $\langle d \rangle$ имеет размер \sim одного проявленного зерна ядерной фотоэмульсии и корреляция между d и углом φ не наблюдается.

Для оценки подавления фона мы считали, что конгломераты Мо имеют круглую форму с радиусом $\langle R_k \rangle \sim 3$ мкм, а “опасная зона” вокруг них имеет размер $\sim d$ (0.6 мкм). В этом случае количество распадов ${}^{40}\text{K}$ и ${}^{90}\text{Sr}$ в “опасной зоне” вблизи всех конгломератов для экспозиции с 1 кг ${}^{100}\text{Mo}$ (5.6 литра эмульсии, $n_{\text{kongl}} \sim 10^{12}$) будет подавлено на фактор $\sim 1.5 \times 10^{-2}$ от полного числа распадов в эмульсии. Конкретное количество фоновых событий зависит от содержания в желатине калия и стронция. При очистке желатина от калия до $\sim 10^{-8}$ г/г количество распадов ${}^{40}\text{K}$ в “опасной зоне” составит $\sim 0.7 \times 10^{-5}$ распадов/год·конгломерат, а вероятность наблюдения двух элек-

тронов $\sim 5 \times 10^{-11}$. Эта величина должна быть еще уменьшена на вероятность вылета двух электронов из одной точки (области, равной d) ~ 0.1 . В результате число фоновых 2β -“событий” от ^{40}K составит ~ 5 за 1 год экспозиции с 1 кг ^{100}Mo . В область энергии (3 ± 0.3) МэВ попадет $\ll 1$ события. Возможна и более глубокая очистка желатина от нежелательных примесей.

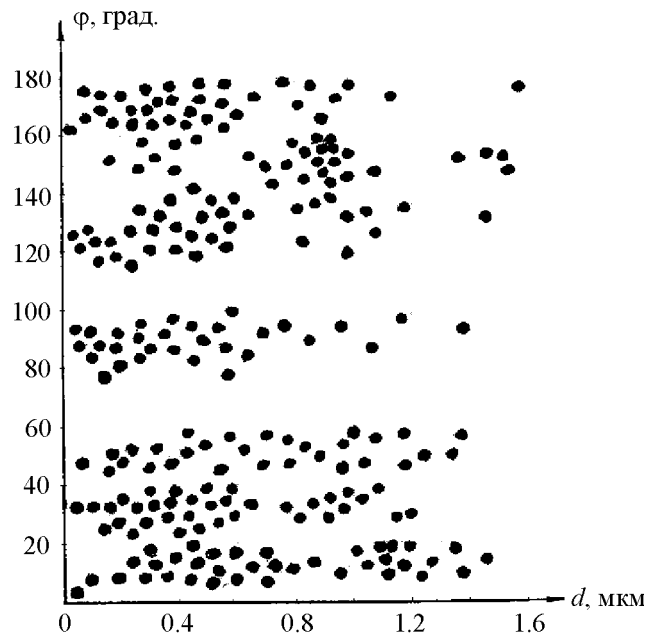


Рис. 3: Зависимость угла φ между двумя треками от величины d .

В случае со стронцием оба электрона вылетают из одной точки и это событие может имитировать двойной бета-распад. При активности ^{90}Sr в желатине на уровне 1 мБк/кг за 1 год измерений с 1 кг ^{100}Mo в “опасной зоне” произойдет $\sim 10^3$ распадов. Вклад двухэлектронных событий в область энергий > 2.8 МэВ составит меньше 1 события (при энергетическом разрешении 10%). Кроме этого следует иметь в виду, что в этом случае мы будем иметь дело с “асимметричными” событиями (энергия электронов будет ~ 0.6 и ~ 2.2 МэВ), что также может быть использовано для уменьшения фона от ^{90}Sr , поскольку в случае безнейтринного двойного бета-распада (массовый механизм) наиболее вероятно именно “симметричное” распределение электронов по энергии в паре (см. обсуждение подобной ситуации в [6]).

– В ядерной фотоэмульсии всегда, в том или ином количестве, присутствуют примеси естественных радиоактивных элементов ториевого, уранорадиевого и актиниевого рядов. В типичном (не экстремальном) случае в 1 см³ эмульсии содержится ~ 20 рас-

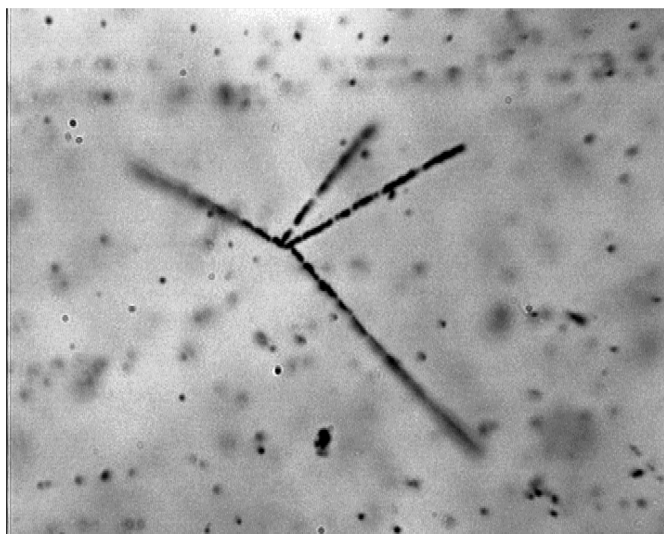


Рис. 4: “Звезда”, наблюдаемая в эмульсии при последовательном α -распаде элементов ториевого радиоактивного ряда.

падов, образующих 3–5 лучевые звезды, состоящие из α -частиц (1 атом тория \sim на 10^8 атомов эмульсии) [7]. Казалось бы, электронные распады этих элементов, происходящие в желатине вблизи конгломератов Мо, могут образовать фон, который будет имитировать 2β -распад Mo^{100} . Реально же происходит следующее: цепочка распадов трех рядов естественной радиоактивности **всегда** начинается с последовательного испускания 3–5 α -частиц и только после этого возникают элементы, которые являются источниками β - и γ -излучения. В эмульсии с высокой эффективностью наблюдаются 3–5 лучевые α -звезды (рис. 4) и даже измерена диффузия радона (Rn), который возникает в радиевом ряду. В [7] приведены спектры пробегов α -частиц в ядерной фотоэмульсии, возникающих при распаде ядер естественных радиоактивных элементов. Эти пробеги 10–50 мкм (энергия α 3–9 МэВ) хорошо наблюдаются в эмульсии и эффективность их регистрации $\approx 100\%$. Такие “двойные события” (конгломерат Мо и α -звезда) с большой вероятностью позволят определить и исключить фоновый электрон. В том случае, если ториевая звезда окажется внутри конгломерата, то и её наблюдение возможно, т. к. пробег α -частиц значительно превышает размер конгломерата ^{100}Mo .

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 11-02-00476.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. H. Fremlin and M. C. Walters, Proc. Phys. Soc. **65**, 911 (1952).

- [2] А. С. Барабаш и др., Препринт ИТЭФ N 13 (1987); А. С. Барабаш и др., Препринт ИТЭФ № 104, 88 (ИТЭФ, Москва, 1988); A. S. Varabash et al., Preprint ИТЭФ № 131, 90 (ИТЭФ, Moscow, 1990).
- [3] M. Dracos, J. Soc. Photogr. Sci. Technol. Japan **71**, 335 (2008).
- [4] V. D. Ashitkov et al., Nucl. Instr. Meth. **A 621**, 701 (2010).
- [5] А. А. Поманский, Препринт ФИАН N 7 (М., ФИАН, 1969).
- [6] R. Arnold et al., Nucl. Instr. Meth. **A 503**, 649 (2003).
- [7] C. F. Powell, P. H. Fowler, and D. H. Perkins, *The Study of Elementary Particles by the Photographic Method* (Pergamon, New York, 1959).

Поступила в редакцию 7 июля 2011 г.