

УДК 539.1.05, 539.123

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПО ИХ ПРОБЕГУ В ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ

А. С. Барабаш¹, В. Я. Браднова², В. В. Дубинина¹, Н. П. Егоренкова¹,
С. И. Коновалов¹, Е. А. Пожарова¹, Н. Г. Полухина³, В. А. Смирнитский¹,
Н. И. Старков³, Тан Ханг Со³, М. М. Чернявский³, Т. В. Щедрина³,
В. И. Юматов¹

Координатным методом измерены в ядерной фотоэмульсии пробеги монохроматических мюонов, возникающих в $\pi \rightarrow \mu\mu$ распаде, с целью определения по пробегу их энергии. Дисперсия измерения этим методом энергии мюонов $\sigma_\mu = (0.11 \pm 0.01)$ МэВ, что соответствует точности определения энергии заряженной частицы по пробегу в ядерной эмульсии $\approx 3.1\%$. Разработанная методика позволит измерить энергию электронов в 2β -распаде (~ 3 МэВ) с точностью (5 – 6)%.

Ключевые слова: нейтрино, ядерная фотоэмульсия, распознавание образов.

В работе [1] была показана возможность применения ядерной фотоэмульсии с молибденовым наполнением для поиска 2β -распада. Оценка фоновых условий, проанализированных в работе [2], показала возможность за один год измерений достичь чувствительности к 0ν -распаду ^{100}Mo на уровне $\sim 1.5 \cdot 10^{24}$ лет.

Существенным обстоятельством, определяющим успешность выполнения этой работы, является возможность автоматизированной обработки эмульсий: поиск и распознавание треков частиц на комплексе ПАВИКОМ. При распознавании треков частиц одной из основных задач является задача их отделения от фона. Одним из таких фоновых процессов является распад радиоактивных ядер, присутствующих в фотоэмульсии,

¹ ФГБУ ГНЦРФ ИТЭФ, 117218 Россия, Москва ул. Большая Черемушкинская, 25.

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

³ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: poluhina@sci.lebedev.ru.

с одновременным испусканием электронов. Основным признаком таких реакций является наличие характерных пространственных конфигураций – звёзд (рис. 1(а)). Их предварительный отбор осуществляется по характерному признаку – малой величине отношения числа пикселей, образующих звезду, к площади описанного прямоугольника (рис. 1(б)). Эта процедура осуществляется на стадии кластеринга (выделение на оцифрованном изображении областей потемнения заданного уровня). Далее для распознавания внутренней структуры звезды (её лучей, их положения на изображении и т.д.) на изображение звезды накладывается сетка взаимно-перпендикулярных линий. Места пересечения звезды и линий, образующих сетку, формируют “скелет” звезды, т.е. набор отрезков прорисовывающих область её расположения (рис. 2(а)).

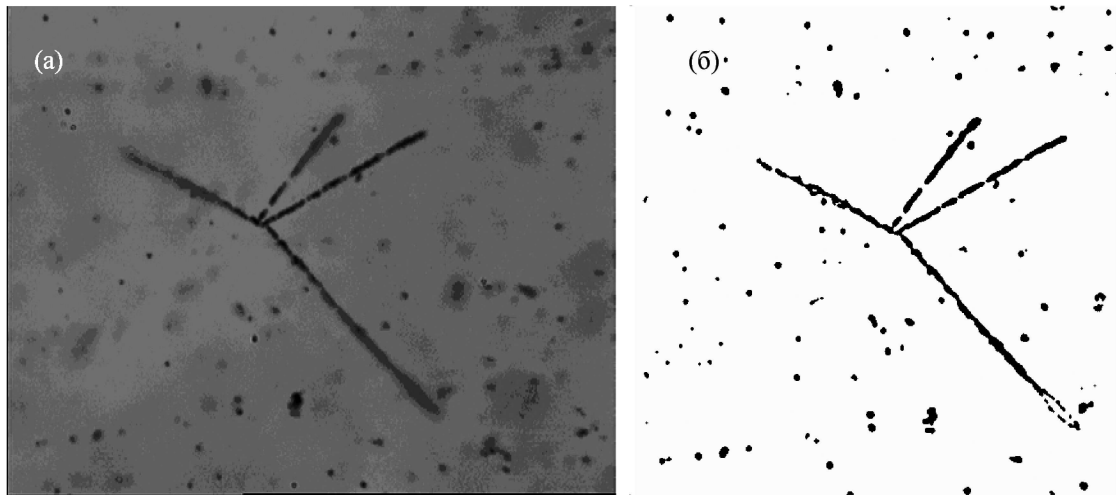


Рис. 1: (а) Исходное изображение звезды. (б) Результат кластеринга.

Для поиска положения лучей близко расположенные отрезки группируются и через их центры масс проводятся прямые линии – оси лучей. Область взаимного пересечения осей соответствует положению вершины распада. С учётом знания вершины положение лучей уточняется. В силу неоднородности потемнения различных частей звезды на изображении, некоторые лучи при обработке распадаются на отдельные куски, которые необходимо собрать для полного восстановления звезды распада. Для этого анализируются характеристики кластеров, расположенных вблизи звезды. Если ось кластера совпадает с осью одного из лучей звезды, он считается продолжением луча. В итоге формируется полная геометрия звезды.

На рис. 2(б) показан результат применения приведенного выше алгоритма к изображению на рис. 1(а).

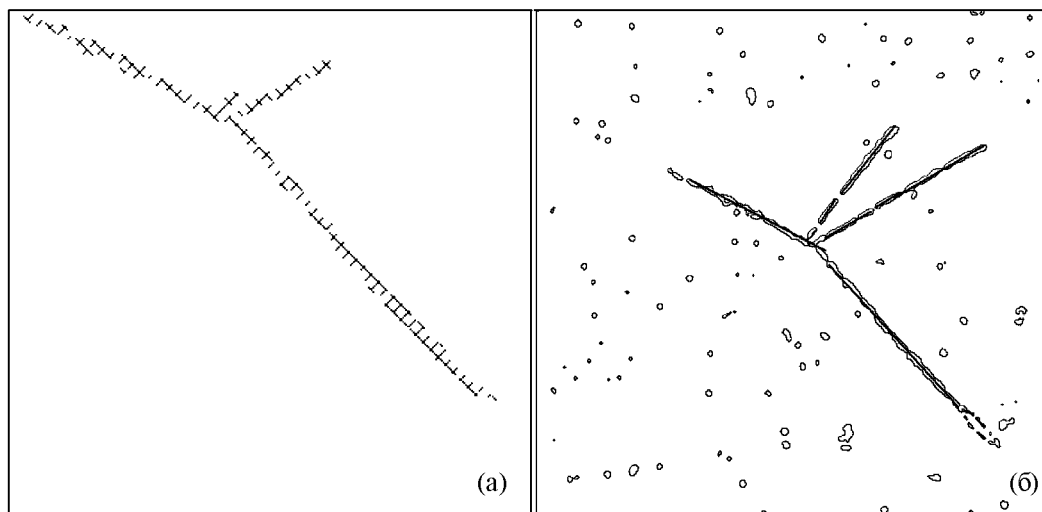
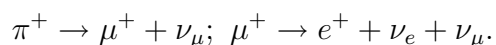


Рис. 2: (а) Вспомогательная сетка на изображении звезды. (б) Результат поиска осей лучей звезды.

В данной задаче распады ядер являются фоновым процессом и целью распознавания звезды является отсеивание событий такого рода. Однако данный алгоритм можно применить и в случае необходимости осуществить полный анализ событий с распадом ядер. Так для восстановления пространственной геометрии звезды необходим просмотр изображений в вышележащих и нижележащих слоях и поиск продолжения лучей на них. Авторами продолжается разработка такого специального программного обеспечения.

Возможности этого эксперимента зависят также и от точности измерения энергии электронов, которая определяется по их пробегу в ядерной фотоэмульсии. Обычно для калибровки используют монохроматические электроны с энергией ~ 1 МэВ от радиоактивного источника ^{207}Bi .

В настоящее время производство отечественной ядерной фотоэмульсии находится в стадии восстановления технологии фирмой «Славич» и пока она не может быть использована для экспериментов. Поэтому для определения точности и разработки методики измерения энергии заряженных частиц по их пробегу мы использовали эмульсию НИК-ФИ БР-2, облученную медленными пионами в 1967 г. на ускорителе ОИЯИ. При остановке π^+ -мезон распадается по схеме, которая со 100% эффективностью наблюдается в эмульсии:



В этом распаде возникают строго **монохроматические мюоны** с энергией

4.12 МэВ. Пробег таких мюонов в стандартной эмульсии БР-2 равен 600 мкм и зависит от целого ряда причин: флуктуаций в потере энергии (по разным причинам), т.н. страглинг, влажности эмульсии и, наверное главное, от качества изготовления, влияющего на неравномерность плотности эмульсии вдоль траектории заряженной частицы. Последняя причина практически не поддается контролю. На величину пробега мюона могут влиять распады на лету. Для оценки их влияния необходимо сравнить времена жизни пионов и мюонов со временем торможения до их полной остановки. Это время для пионов: торможение в поле зрения микроскопа (120 мкм) равно $0.0034 \cdot 10^{-9}$ сек [3], а время жизни $\tau_\pi = 2.6 \cdot 10^{-8}$ сек [4], что на ~ 4 порядка больше. Аналогичные значения для мюонов (пробег 600 мкм) составляют: $0.0095 \cdot 10^{-9}$ сек и $\tau_\mu = 2.2 \cdot 10^{-6}$ сек. При таком соотношении времен торможения и жизни можно ожидать, при нашей статистике, не больше, чем по ~ 1 распаду π и μ на лету.

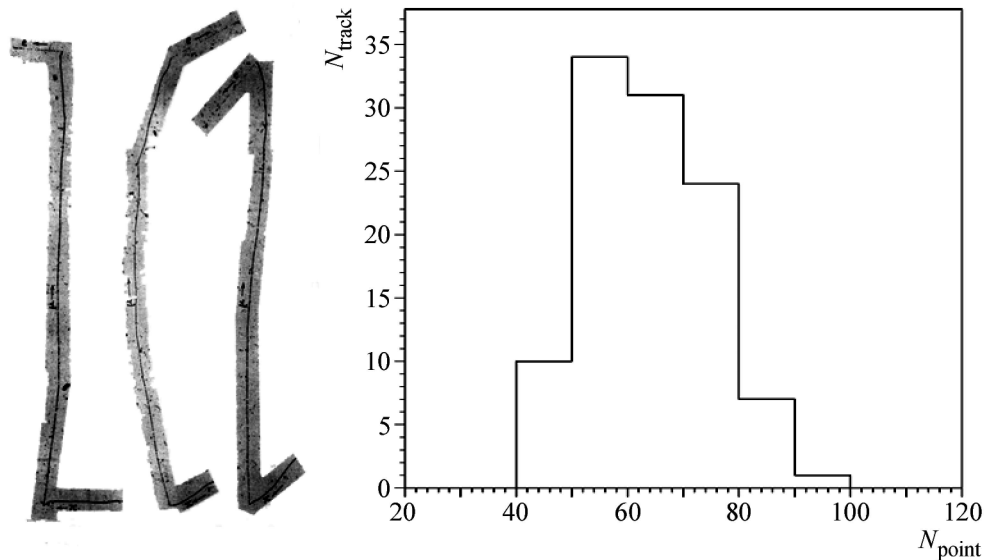


Рис. 3: Фотографии трех событий $\pi\mu$ распада, расположенных в фокальной плоскости объектива (из атласа, опубликованного в [5]).

Рис. 4: Распределение числа точек измерения координат на следах мюонов.

Распад остановившегося пиона происходит изотропно, поэтому измеряются мюоны, вылетающие под различными углами, и единственным критерием отбора является условие, чтобы весь пробег мюона уложился в одном эмульсионном слое. На рис. 3 показаны фотографии трех $\pi\mu$ распадов, расположенных в фокальной плоскости объектива (поле зрения ~ 120 мкм). Это позволило совместить фрагменты фотографий

одного события в одну фотографию (материал взят нами из атласа, опубликованного в приложении к работе [5]).

До своей остановки 4-мэвный мюон заметно рассеивается, особенно в конце пробега, поэтому для точного измерения длины пробега необходимо тщательно отслеживать изменения траектории мюона. Измерения производились координатным методом. В зависимости от геометрии траектории и рассеяния на треке мюона измеряются координаты $x_i; y_i; z_i$ в 40–100 точках, по которым вычисляется длина трека мюона, как сумма длин отрезков. На рис. 4 приведено распределение числа точек измерений “ n ” на следе мюона ($\langle n \rangle = 65$). Эта методика позволила нам улучшить точность определения энергии заряженных частиц по их пробегу. Измерения проводились на микроскопе KSM, связанном с компьютером. Программное обеспечение позволяло проводить оперативный контроль результатов измерений.

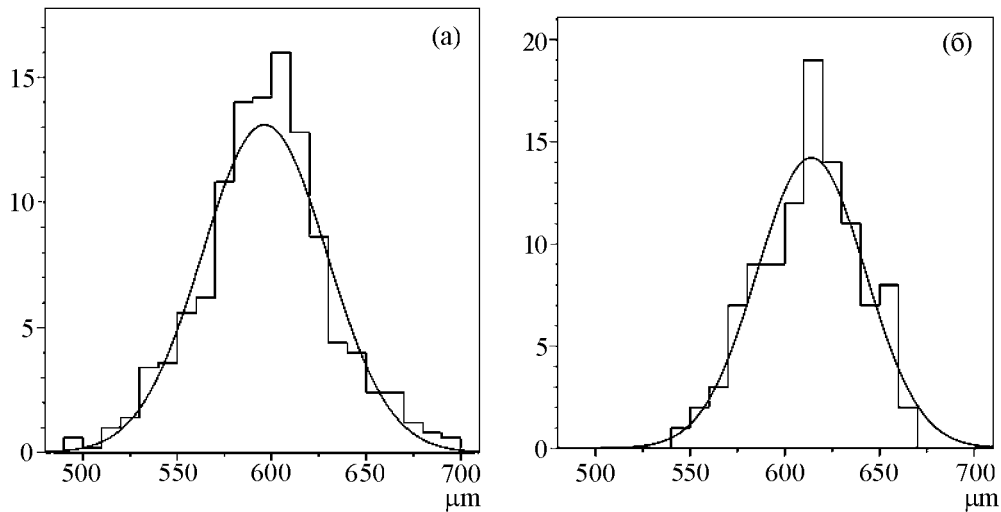


Рис. 5: (а) Гистограмма измерения пробегов мюонов, возникающих при распаде $\pi \rightarrow \mu\nu_\mu$ из работы [5]; (б) то же самое для наших измерений.

На рис. 5(а) показаны результаты лучших, по нашему мнению, измерений пробегов мюонов, возникающих в $\pi \rightarrow \mu\nu_\mu$ распаде [5], а на рис. 5(б) – результаты наших измерений. Обе гистограммы описываются распределением Гаусса с параметрами:

$$\text{Гистограмма из работы [5]} : \langle R_\mu \rangle = (596.2 \pm 1.0) \text{ мкм} \quad \sigma_\tau = (33.0 \pm 1.0) \text{ мкм.}$$

$$\text{Наши измерения} : \langle R_\mu \rangle = (614.0 \pm 1.0) \text{ мкм} \quad \sigma_\tau = (28.7 \pm 0.9) \text{ мкм.}$$

Дисперсия наших измерений меньше дисперсии, полученной в работе [5].

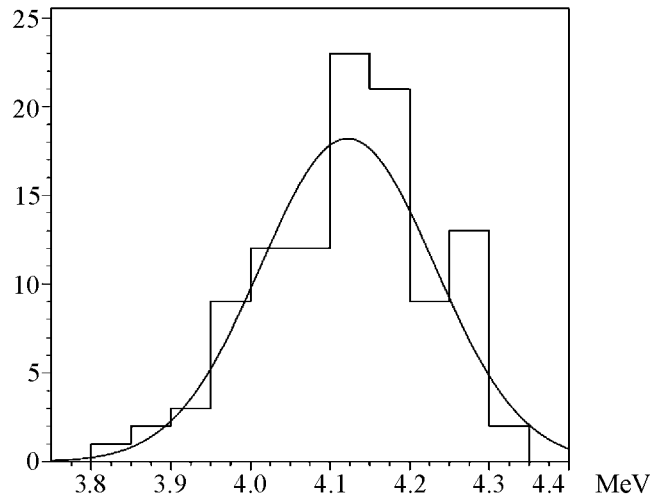


Рис. 6: Распределение по энергии мюонов, полученное из расчетов по соотношению (1) с коэффициентом $a_\mu = 0.0989$.

Пересчет пробегов различных заряженных частиц в ядерной эмульсии Ильффорд G-5 в их энергию опубликован в работе [5]. Производители ядерной фотоэмульсии сохраняют постоянство ядерного состава, поэтому, теоретически, соотношение пробег–энергия должно быть постоянным для данного типа эмульсии. Как показал опыт [5] при изменении влажности от 20% до 60% калибровочные измерения пробег–энергия практически остаются неизменными. В интервале энергии от 1 до 50 МэВ установлена и проверена зависимость пробег–энергия для заряженных частиц в эмульсии Ильффорд G-5:

$$\begin{aligned}
 E_t &= a_t(R_t)^k, \\
 E_d &= a_d(R_d)^k, \\
 E_p &= a_p(R_p)^k, \\
 E_k &= a_k(R_k)^k, \\
 E_\pi &= a_\pi(R_\pi)^k, \\
 E_\mu &= a_\mu(R_\mu)^k.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь R измеряется в мкм, а E – в МэВ, показатель степени “ k ” для всех частиц одинаковый $k = 0.581$; индексы у энергии, пробегов и множителей соответствуют частицам: t – тритию, d – дейтрону, p – протону, k – каону, π – пиону, μ – мюону. Измерено [5]: $a_t = 0.398$, $a_d = 0.336$, $a_p = 0.251$, $a_k = 0.192$, $a_\pi = 0.113$, $a_\mu = 0.101$.

Незначительные изменения ядерного состава эмульсии влияют на значение коэффициента a_i . Поэтому для точных измерений необходимо проводить калибровку эмульсии путем ее облучения известными частицами с определенной энергией. В наших измерениях по результатам калибровки определен для эмульсии БР-2 коэффициент $a_\mu = 0.0989$.

На рис. 6 показано распределение по энергии мюонов, возникающих при распаде остановившихся пионов, рассчитанное по соответствующей формуле (1). Результат фитирования гистограммы распределением Гаусса дает значения:

$$\langle E_\mu \rangle = (4.12 \pm 0.01) \text{ МэВ} \quad \sigma_\mu = (0.11 \pm 0.01) \text{ МэВ}.$$

Несимметричное распределение относительно средней энергии связано с тем, что длина пробега, определенная как сумма длин прямолинейных отрезков всегда меньше истинной длины траектории. Вычисление по результатам (рис. 6) средней квадратичной ошибки дает значение $\sigma_\mu = (0.104 \pm 0.014) \text{ МэВ}$, близкое к полученному фитированием.

Таким образом, нами определена точность измерения энергии заряженной частицы (мюона) по пробегу в ядерной эмульсии. Этот результат точнее известного нам результата измерения “пробег–энергия” для мюонов [5] $\sigma_\mu \approx 4\%$. Однако в эксперименте предстоит измерение энергий двух электронов с суммарной энергией до 3 МэВ. Нормальная эмульсия имеет чувствительность $\sim(30\text{--}35)$ зерен/100 мкм и это позволяет достаточно точно отслеживать конфигурацию траектории электрона на всем его пути до самой остановки. Потеря точности на этом этапе измерений не может быть значительной. Наибольшие трудности возникнут при переходе из слоя в слой эмульсионной камеры. Такой переход неизбежен, т. к. пробег электронов в 2β -распаде ^{100}Mo может достигать 5 мм (при $E_e = 3 \text{ МэВ}$), а толщина эмульсионных слоев в камере ~ 500 мкм. При переходе из слоя в слой последнее наблюдаемое зерно трека, практически всегда будет находиться не на поверхности, а где-то в глубине эмульсии. Поэтому при каждом переходе дважды будет проводиться экстраполяция траектории для определения точек пересечения электроном двух поверхностей. Радиационные поправки к энергии электрона $\sim 1\%$, т.к. его энергия значительно меньше критической. Флуктуация плотности эмульсии вдоль траектории будет существенно меньше влиять на пробег из-за лучшего усреднения неоднородностей на длине траектории в несколько мм. Все эти и, возможно, другие источники, увеличивающие погрешность измерения энергии электронов по их пробегу, могут быть надежно установлены путем облучения небольших эмульсионных камер электронами с точно известной энергией. По нашим предварительным оценкам точность определения энергии электронов по их пробегу может быть $\sim(5\text{--}6)\%$.

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

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. D. Ashitkov et al., NIM, A **621**, 701 (2010).
- [2] В. Д. Ашитков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **38**(10), 22 (2011).
- [3] H. Fay, K. Gottstein and K. Hain, Nuovo Cimento Suppl. **11**, 234 (1954).
- [4] A. V. Balantekin et al., Journal of Physics G **37**(7A), 31 (2010).
- [5] С. Пауэлл, П. Фаулер, Д. Перкинс, *Исследование элементарных частиц фотографическим методом* (Изд. ин. лит., 1962 г.).

Поступила в редакцию 3 октября 2012 г.