

12

Исследование каскадного размножения ливня электронов при энергии 26 GeV в эмульсионной камере, прослоенной свинцом

© К.В. Александров, Ю.Д. Алешин, О.К. Егоров,
В.В. Колесников, Г.И. Мерзон, Е.А. Пожарова,
В.А. Рябов, В.И. Силаев, В.А. Смирнитский,
Н.И. Старков, И.С. Тростин, В.А. Царев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
Государственный научный центр РФ
"Институт теоретической и экспериментальной физики", Москва

Поступило в Редакцию 17 ноября 1999 г.

Проведено исследование развития электронно-фотонных ливней на свинцовых пластинах общей толщиной 3.5 рад. ед. в эмульсионной камере при энергиях электронов 26 GeV. Показано, что экспериментальное значение коэффициента размножения электронов $P^{\text{exp}} = 19.4 \pm 1.4$ соответствует рассчитанному с учетом поправок $P^{\text{calc}} = 20.4$.

В настоящее время для обнаружения нейтринных осцилляций предложен ряд экспериментов, использующих метод "дальних нейтрино" и детекторов с большими чувствительными массами (≈ 100 t). Для прямого наблюдения осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ в проектах MINOS [1] и OPERA [2] предложено использовать слоеные свинцово-эмульсионные детекторы массой ≈ 1000 t. Ядерная фотоэмульсия обеспечивает также хорошие возможности для идентификации электронов в реакции $\nu_e + N \rightarrow e + X$ и, следовательно, осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. В фотоэмульсионном эксперименте чувствительность обнаружения этой моды ограничивается только примесью ν_e в пучке ν_μ .

С помощью ядерной эмульсии можно получить хорошую режекцию первичных электронов от примеси продуктов распада π^0 -мезонов. Продукты распада π^0 -мезонов отделяются по наличию двух или четырех треков заряженных частиц от электронов, образованных в реакции $\nu_e + N \rightarrow e^- + X$, где образуется одиночный электрон. С целью изучения

возможности определения энергии электрона в гибридных фотоэмульсионных экспериментах было проведено исследование электронно-фотонных ливней, регистрируемых в эмульсионных пластинах, прослоенных свинцом.

Постановка эксперимента. Эмульсионная камера состояла из 22 слоев ядерной фотоэмульсии Р-2Т, прослоенных свинцовыми пластинами толщиной 1 мм. Радиационная длина для свинца соответствует 5.6 мм, суммарная толщина свинца в камере составляла 20 мм. Эмульсионные слои размером 50 × 50 мм представляли собой "сэндвич": триацетат целлюлозы толщиной 180 мкм, политый с двух сторон эмульсией по 50 мкм с каждой стороны. Для исключения контакта свинца с эмульсией слои ядерной фотоэмульсии покрывались защитным слоем желатина толщиной в несколько микрон. Собранный камера облучалась в пучке электронов с энергией 26 GeV ускорителя ИФВЭ. Время экспозиции подбиралось таким образом, что интегральный сброс на камеру составил 10^4 электронов. Слои эмульсии, облученной в пучке электронов, фиксируют картину развития электромагнитных ливней после прохождения ими свинцовых слоев.

Просмотр и анализ треков в эмульсии проводился с помощью установки МАС-1 [3], на которой при сканировании эмульсии по глубине однозначно выделялись треки, отвечающие пучку электронов высокой энергии, падающему нормально к поверхности эмульсии. Эмульсионная камера перпендикулярного облучения позволяет с хорошей точностью определять направление треков электронов. Камера позволяет осуществлять переход от одного слоя к другому по единой привязке, когда выбранная система координат жестко связана с фрезерованными сторонами пластин камеры. Точность привязки составляет 10 мкм.

Экспериментальные результаты. Начало просмотра проводилось с первого эмульсионного слоя, расположенного по пучку. На этом слое пересчитывались треки, имеющие направление, близкое к нормали к плоскости эмульсии в диапазоне углов $\pm 15^\circ$. Полный просмотр этого слоя позволил установить интегральную картину заполнения эмульсионной камеры треками электронов от пучка на ее входе. Полученная интегральная картина представлена в виде проекции распределения этих треков на одну из осей в плоскости эмульсии и показана на рис. 1. Точки — результат суммирования числа треков по области $0.1 \times 32 \text{ mm}^2$ (0.1 мм — величина поля зрения объектива в одном из направлений, а 32 мм — длина области сканирования эмульсионного слоя в перпенди-

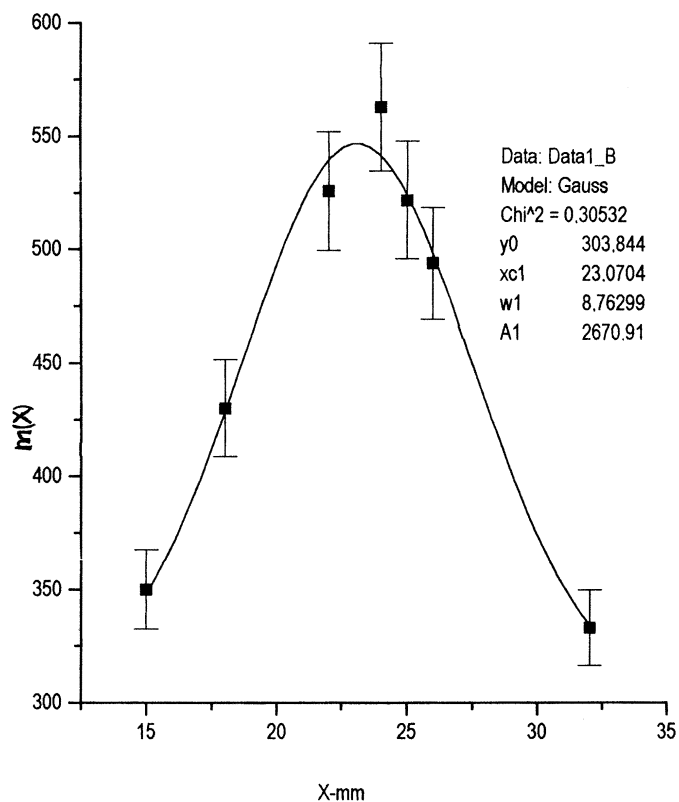


Рис. 1. Распределение числа электронов, измеренное на первой эмульсионной пластине, по одной из координат в плоскости этой пластины. Полное значение числа треков, вычисленное по аппроксимации гауссовой кривой, — 3830.

кулярном направлении). Кривая I — результат аппроксимации данных выражением

$$Y = \frac{A}{\sigma\sqrt{\pi}} \left(\exp - \left(\frac{x - x_c}{\sigma} \right)^2 \right) + Y_0,$$

где $x_c = 23.1 \pm 0.4$ mm, $\sigma = 8.6$, $Y_0 = 301$. На рисунке хорошо видно, что кроме гауссовой кривой имеется также заметная фоновая подложка. Ско-

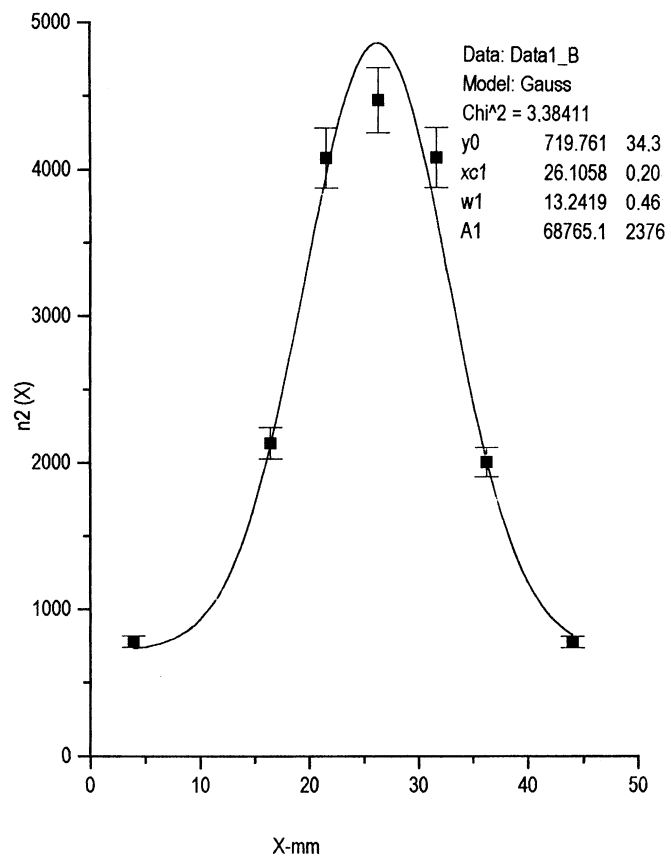


Рис. 2. Распределение числа электронов, измеренное на предпоследней эмульсионной пластине, по одной из координат в плоскости этой пластины. Полное значение числа треков, вычисленное по аппроксимации гауссовой кривой, — 74300.

рее всего, этот фон можно объяснить присутствием электронов других энергий, которые являются примесью к основному сформированному пучку. Для получения данных о поведении электромагнитного каскада в эмульсии при прохождении электронов через свинец мы провели

интегральные измерения на предпоследней пластинке эмульсионной камеры (кривая на рис. 2) — результат аппроксимации экспериментальных данных функций Гаусса. Полная множественность частиц после прохождения пучка электронов через стопку с эмульсией и свинцом определяется площадью под этим распределением.

Для того чтобы корректно получить коэффициент каскадного размножения ливня из наших данных требуется введение поправок. Это прежде всего связано с фоновыми частями распределения электронов, представленных на рис. 1 и 2. Поскольку распределения каскадных ливней представляют собой зависимость числа частиц от энергии, то следует ожидать, что частицы пучка и частицы фона имеют разные коэффициенты размножения. Для вычисления коэффициента размножения электронов пучка следует рассмотреть процессы их электромагнитного взаимодействия с веществом [4,5]: 1. Внутреннее тормозное излучение. 2. Образование пар. 3. Комптон-эффект. 4. Ионизационные потери.

Полное число электронов в каскаде с энергией выше чем E определяется формулой [5]:

$$N(E_0, E, t) = \sum_{n=0}^{\infty} nP(E_0, E, n, t),$$

где $P(E_0, E, n, t)$ — вероятность найти n -электронов с энергией выше чем E при глубине поглотителя t , в случае прохождения первичного электрона с энергией E_0 .

Кроме этого, необходимо учесть потери на поглощение в свинце, которые приводят к уменьшению числа электронов в каскадах. Используя данные из работы [6], можно получить следующее распределение этих потерь, в зависимости от толщины свинца (здесь X в mm, а ΔE_{abs} — в MeV):

$$\Delta E_{abs}(X) = 14.7 - 5.4X + 0.7X^2.$$

Функцию размножения электронов при прохождении t радиационных длин в свинце можно представить как

$$n(t) = -4.4 + 11.9t - 2.4t^2.$$

В нашем случае, учитывая поглощение каскадных электронов в свинце, коэффициент размножения электронов можно представить сле-

дующим образом:

$$P_p = \int_{0.5}^{3.7} n(t) dt.$$

Верхний предел в интервале определяется числом пройденных радиационных длин свинца, а нижний — эффектом поглощения электронов и их многократным рассеянием в свинце.

Кроме поглощения, часть каскадных электронов теряется еще из-за их многократного рассеяния на большие углы при прохождении свинцовых пластин. Расчетный коэффициент размножения каскадных электронов с учетом их многократного рассеяния и поглощения при прохождении свинцовых пластин получился равным $P^{calc} = 20.4$.

Экспериментальное значение коэффициент размножения P^{exp} определяется из отношения

$$P^{exp} = \frac{\int G_2(x) dx}{\int G_1(x) dx} = 19.4 \pm 1.4,$$

где $\int G_2(x) dx$ есть полное число треков на предпоследней пластине, распределение которых описывается функцией Гаусса (без фона), а $\int G_1(x) dx$ — интегральное распределение числа треков на первой пластине эмульсионной камеры, также за вычетом фона. Пределы интегрирования можно видеть на рис. 1 и 2. Экспериментальное значение коэффициента размножения электронов в свинце и значение этого коэффициента, вычисленное с учетом поправок на поглощение и рассеяние в свинце, совпадают в пределах ошибок.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 99–02–16 195 и № 98–02–17 428.

Список литературы

- [1] *The MINOS collaboration // The Hybrid Emulsion Detector for MINOS R&D Proposal. NuMI-L-473. April 1999.*
- [2] *The OPERA Collaboration // A long baseline ν , appearance experiment in the CNGS beam from CERN to Gran Sasso (PROGRESS REPORT). CERN/SPSC 99-20, SPSC/M635, LNGS-LOI 19/99. August 27, 1999.*
- [3] *Алешин Ю.Д., Колесников В.В., Силаев В.И. // ПТЭ. 1997. № 2. С. 43.*

Письма в ЖТФ, 2000, том 26, вып. 12

- [4] Белецкий С.З., Иваненко И.В. // УФН. 1959. Т. LXIX. В. 4. С. 591.
- [5] Butcher J., Messel H. // Nucl. Physics. 1960. V. 20. P. 15.
- [6] *Committee on nuclear science* // Studies in penetration of charged particles in matter. Report № 39. Washington. 1964.