

Г. П. ЕЛИСЕЕВ, В. К. КОСМАЧЕВСКИЙ и В. А. ЛЮБИМОВ

ЗАВИСИМОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПЕРВИЧНОЙ И ПОЛНОЙ ИОНИЗАЦИЙ μ -МЕЗОНОВ ОТ ЭНЕРГИИ

(Представлено академиком А. И. Алихановым 22 IV 1953)

Зависимость ионизации, производимой заряженной частицей, от энергии теоретически хорошо изучена (1, 2). Однако вычисленный из теории ход ионизирующей способности μ -мезонов для $E > mc^2$ получил определенное экспериментальное подтверждение лишь в последнее время в работах (3-5).

Методически правильная, на наш взгляд, работа (4) имеет недостаточную точность ввиду малой статистики. В работе (5) сравнение экспериментальных точек проводится с теоретической кривой, которая не соответствует рабочей смеси пропорционального счетчика. Приведенный в работе теоретический эффект плотности завышен примерно в 1,5 раза. Применение метода определения средней (вместо вероятной) ионизации пропорциональным счетчиком с помощью амплитудного дискриминатора привело к систематическому занижению относительной ионизации для всех $I/I_{\text{мин}} > 1$ (до 5-10%).

Указанные недостатки, не снимая основного вывода работы (5) о наличии логарифмического роста потерь на ионизацию, ставят под сомнение вывод автора о том, что ему удалось экспериментально наблюдать эффект плотности в газе счетчика. В работе (3) имеет место аналогичное занижение относительной средней ионизации для $I/I_{\text{мин}} > 1$.

В настоящей работе двумя различными способами получены спектры, соответственно, первичной и полной ионизации для μ -мезонов* и найден метод обработки результатов ионизационных измерений, который при полной общности является, на наш взгляд, лучшим по точности.

Первичная ионизация измерялась хорошо прокалиброванным гелиевым 10-слойным малоэффективным счетчиком, установленным над маг-

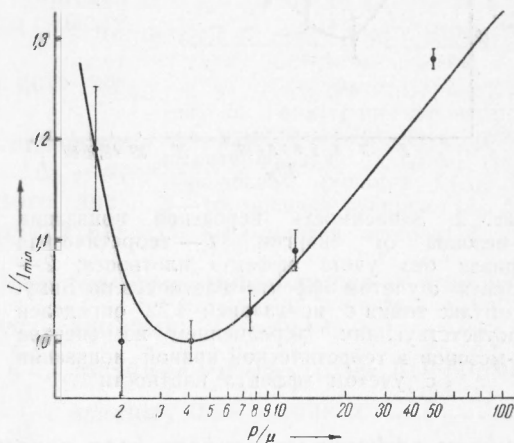


Рис. 1. Зависимость первичной ионизации μ -мезонов от энергии. Импульс точки с ионизацией 1,28 определен соответствующим усреднением из спектра мезонов

* Экспериментальные результаты для первичной ионизации взяты из работы (6).

нитным масс-спектрографом⁽⁶⁾, измерявшим импульс частицы до $p_{\text{макс}} = 2 \cdot 10^9$ эв/с. Выше малоэффективного счетчика находился ряд гейгеровских счетчиков, позволявший исключать случаи неодионого прохождения частиц через малоэффективный счетчик. Над всей установкой помещался 50-сантиметровый слой свинца для исключения из потока μ -мезонов всех иных частиц. Вклад в ионизацию, даваемый другими, не исключенными 50 см свинца частицами, ничтожно мал.

Теоретическая кривая для первичной ионизации⁽⁷⁾ и экспериментальные точки со статистическими погрешностями приведены на рис. 1.

Для μ -мезонов с импульсами $p/\mu = 20$ и больше становится заметной вероятность выбивания из стенок малоэффективного счетчика δ -электронов, способных пройти газовый объем счетчика и не быть зафиксированными установкой. Вероятно, это обстоятельство является одной из главных причин несоответствия последней экспериментальной точки (p/μ от 14,8 эв/с до ∞) теоретической кривой.

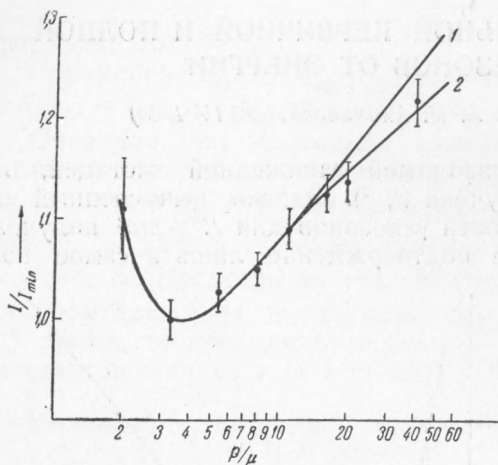


Рис. 2. Зависимость вероятной ионизации μ -мезонов от энергии. 1 — теоретическая кривая без учета эффекта плотности; 2 — кривая с учетом эффекта плотности по Вику. Импульс точки с ионизацией 1,22 определен соответствующим усреднением из спектра μ -мезонов и теоретической кривой ионизации с учетом эффекта плотности

учетом эффекта плотности (для воздуха) по Вику⁽²⁾ и экспериментальные точки со статистическими погрешностями. Ионизационные потери энергии во всех импульсных интервалах (кроме интервала p/μ от 20 до ∞) определены из показаний пропорциональных счетчиков «универсальным» методом.

Метод обработки результатов измерений

Потери энергии на ионизацию в пропорциональном счетчике, как известно, отвечают распределению Л. Ландау⁽⁸⁾ — кривой весьма асимметричного вида. В этом случае обработка экспериментальных данных методом «среднеарифметического», когда окончательное значение Δ_μ представляется в виде среднего арифметического результатов измерений ионизации, или интегрально-дифференциальным методом⁽⁹⁾, где за Δ_μ выбирается наименьшее значение из всех показаний, по разным причинам не является удовлетворительной. Нами был найден «универсальный» метод обработки результатов измерений, который позволяет найти наилучшее приближение к измеряемой величине в общем случае, когда распределением является функция произвольного вида*.

* Недавно Беренс⁽⁴⁾ нашел аналогичное решение этой задачи. Однако, на наш взгляд, метод Беренса не является полностью совершенным.

Пусть результаты измерений $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ величины Δ_0 отвечают распределению $f(\Delta, \Delta_0)$. Иначе говоря, $f(\Delta_i, \Delta_0) d\Delta_i$ есть вероятность того, что в результате i -го измерения получится значение, лежащее в интервале $[\Delta_i, \Delta_i + d\Delta_i]$.

Пусть, далее, в результате i -го измерения получено значение Δ_i . Спрашивается, какова при этом вероятность того, что истинное значение измеряемой величины заключено в интервале $[\Delta_0, \Delta_0 + d\Delta_0]$? Легко видеть, что эта вероятность равна $f(\Delta_0, \Delta_i) d\Delta_0$. Тогда для данной совокупности измерений $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ вероятность того, что величина Δ_0 является истинным значением, равна

$$\Phi = Af(\Delta_0, \Delta_1)f(\Delta_0, \Delta_2) \dots f(\Delta_0, \Delta_n),$$

где A определяется из условия

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi d\Delta_0 = 1. \quad \text{Окончательное значение}$$

можно найти, взяв $\Delta_\mu = \bar{\Delta}_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi \Delta_0 d\Delta_0$.

Ошибку для окончательного значения Δ_μ можно найти, исходя из кривой ошибок. Кривой ошибок является функция Φ . Действительно, по смыслу

функции Φ величина $\int_{\Delta_\mu - a}^{\Delta_\mu + b} \Phi d\Delta_0$ есть ве-

роятность того, что истинное значение заключено внутри интервала $[\Delta_\mu - a, \Delta_\mu + b]$, а ошибка окончательного значения Δ_μ — соответственно, внутри интервала $[-a, +b]$.

Значение Δ_μ и кривую ошибок Φ легко найти также с помощью геометрического построения. Пусть, например, $f(\Delta, \Delta_0) = \varphi\left(\frac{\Delta - \Delta_0}{\xi}\right) \frac{1}{\xi}$ — кривая Ландау. Отложим на оси Δ_0 значения $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ и построим обращенные функции $\varphi\left(\frac{\Delta_0 - \Delta_i}{\xi}\right) \frac{1}{\xi}$ с максимумами в точках $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$.

В результате перемножения функций $\varphi_i \frac{1}{\xi}$ получим кривую ошибок Φ . Центр тяжести площади, ограниченной кривой Φ , определит значение $\Delta_\mu = \bar{\Delta}_0$ (рис. 3).

В экспериментальных условиях значения измеряемой ионизации отвечают распределению, несколько отличающемуся от распределения Ландау, за счет аппаратных ошибок. Это распределение находится из экспериментальных данных один раз для всех опытов с данным счетчиком. Подставляя найденное распределение в выражение для «универсального» метода, найдем ошибку окончательного значения Δ_μ , в которой аппаратные погрешности будут учтены автоматически.

Эффективность «универсального» метода обработки экспериментальных данных была оценена в сравнении с интегрально-дифференциальным и «среднеарифметическим» методами. Сравнение проводилось для случая 4 измерений. 152 значения потерь энергии на ионизацию монокроматических μ -мезонов были произвольно разбиты на 38 групп по 4 значения в каждой. В каждой i -й группе из 4 величин выбиралось значение Δ_μ^i в соответствии со способом обработки. 38 значений Δ_μ^i , подсчитанных одним из методов, флуктуировали вокруг некото-

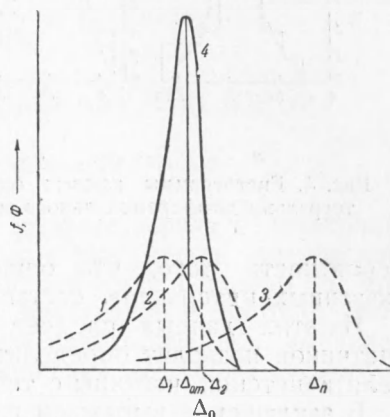


Рис. 3. Геометрическое построение кривой ошибок Φ : 1 — обращенная функция $f(\Delta_0, \Delta_1)$; 2 — обращенная функция $f(\Delta_0, \Delta_2)$; 3 — обращенная функция $f(\Delta_0, \Delta_n)$; 4 — кривая ошибок Φ

рого значения по кривой ошибок, характерной для данного способа обработки. Гистограммы кривых ошибок приведены на рис. 4.

На основании кривых ошибок можно заключить, что «универсальный» метод позволяет определить ионизацию по 4 измерениям с точностью $\pm 10\%$, в то время как методы «среднеарифметический» и интегрально-дифференциальный дают, соответственно, ± 27 и $\pm 17\%$. Добавим, что погрешность отдельного измерения составляет $\pm 34\%$.

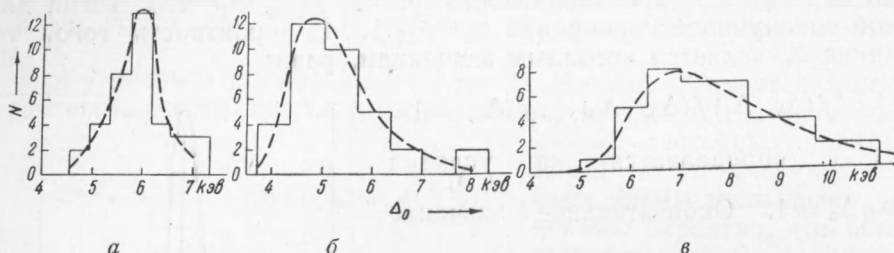


Рис. 4. Гистограммы кривых ошибок: а — «универсального» метода; б — интегрально-дифференциального метода; в — «среднеарифметического» метода

Вероятность того, что ошибки измерений не выходят за пределы указанных интервалов, составляет 70%.

Из этих данных следует, что система из 4 пропорциональных счетчиков позволит определить ионизирующую способность одиночной релятивистской частицы с точностью $\pm 10\%$.

В заключение выражаем глубокую благодарность акад. А. И. Алиханову за ценные советы и указания, которыми мы неизменно пользовались в нашей работе, а также А. С. Кронроду за обсуждение методов обработки экспериментальных данных.

Поступило
27 III 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Б. Росси, К. Грейзен, Взаимодействие космических лучей с веществом, М., 1948. ² Сборн. статей Мезон, под ред. И. Е. Тамма, 1947, стр. 114—132. ³ S. Ghosh et al., Proc. Phys. Soc., A, 65, 68 (1952). ⁴ J. Becker et al., ibid., A, 65, 437 (1952). ⁵ В. Харитонов, ДАН, 86, № 2, 285 (1952). ⁶ А. И. Алиханов, Г. П. Елисеев, ЖЭТФ, 21, 1009 (1951). ⁷ Н. Bethe, Handb. d. Phys., 24/1, 1933, S. 518. ⁸ Л. Ландау, J. of Phys., 8, 201 (1944). ⁹ С. Никитин, ЖЭТФ, 18, 577 (1948).