ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАКА ЗАРЯДА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ В ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ ЭМУЛЬСИИ, ОБЛУЧЕННОЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ СРЕДНЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

МАРИАННА КАРАБОВА, (Marianna Karabová), ЭМАНУЕЛ СИЛЕШ, (Emanuel Síleš), ЙОЗЕФ ТУЧЕК, (Jozef Tuček), ОНДРЕЙ ЧАЛА, (Ondrej Csala),
Кошице,

Содержанием данной работы является количественная проверка возможности определить знак заряда частицы, оставившей в фотографической эмульсии т. наз. релятивистский трек. Наше внимание было сосредоточено прежде всего на применении последовательного анализа, чтобы понизить как можно больше объем измерений, необходимых для получения результата с данной степенью достоверности. В качестве экспреиментального материала послужили фотографические эмульсии НИКФИ БР-2, облученные в магнитном поле интенсивности $4 \,.\, 10^4$ гауссов пучком π^--мезонов с энергией $3{,}65 \,.\, 10^9$ эв. Эмульсии были облучены на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в Дубне.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ЧАСТИЦЫ В ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ ЭМУЛЬСИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Многократное рассеяние частицы в фотографической эмульсии измеряется с помощью координатного метода [1]. Трек частицы делится на одинаковые отрезки длины t (т. наз. ячейки) и в концевых точках этих отрезков измеряются отклонения трека перпендикулярно по отношению к направлению главного винта столика микроскопа, которое приблизительно параллельно треку. Из этих отклонений вычисляются их вторые разности. Набор вторых разностей представляет собой основной источник информации, как о многократном рассеянии, так и об отклонении, вызванном магнитным полем, интенсивность которого имеет направление, перпендикулярное к плоскости эмульсии.

Распределение числа вторых разностей определяется тремя основными факторами:

а. многократным рассеянием частицы, вызванным кулоновским взаимодействием заряженной частицы с атомными ядрами элементов, содержащихся в эмульсии

б. искривлением трека, вызванным магнитным полем

в. т. наз. шумом.

Под шумом мы понимаем не только ошибки, допускаемые нами при отсчитывании на отдельных шкалах, но и отклонения столика микроскопа от прямолинейного движения, и, главное, деформации трека, вызванные неоднородностью эмульсии и ее химической обработкой.

Для треков с относительно большой проекционной длиной мы пренебрегаем влиянием т. наз. дисторсии эмульсии и о влияниях, приведенных в а и в предпологаем, что они статистического характера и взаимо независимы. Далее, мы предполагаем, что они возникают путем суперпозиции множества небольших случайных компонентов, из которых при образовании общего отклонения ни один не доминирует. Этим, в основном, соблюдено условие для образования нормального распеределения вторых разностей.

Однократное рассеяние на большой угол (т. наз. рассеяние Резерфорда) можно исключить, отрезав отклонения, которые больше чем четырехкратное среднее квадратическое отклонение (т. наз. *cut off*).

Влияние магнитного поля проявляется в смещении средней величины вторых разностей от нуля по направлению к положительным или отрицательным величинам, в зависимости от знака заряда частицы.

Из приведенных предположений вытекает, что частота появлений вторых разностей дается выражением

$$f(D) = [2\pi(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)]^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{(D-\bar{D})^2}{2(\sigma_1^2+\sigma_2^2)}\right] \tag{1}$$

где σ_1^2 представляет дисперсию многократного рассеяния, σ_2^2 — дисперсию шума и $\bar{D}$ — среднюю величину вторых разностей. Если эмульсии не облучены в магнитном поле, то $\bar{D} = 0$. Для отдельных параметров из выражения (1) при предположении единичного заряда частицы [1] имеем:

$$\bar{D} = C_1 \frac{H}{p} t^2, \tag{2}$$

$$\sigma_1 = C_2 \frac{1}{p\beta} t^{3/2} \tag{3}$$

где p — импульс и β — скорость частицы, H — интенсивность магнитного поля и t — длина ячейки. C_1 является постоянной и C_2 лишь слабо зависит от энергии частицы. Этой зависимостью, как правило, пренебрегают.

Величина σ_2 не зависит от H, p и β, но зависит от длины ячейки t, от угла, образуемого треком частицы с поверхностью эмульсии (угол погружения Δ) и от качества фотографического материала. Зависимость от t сильно зависит от качества эмульсии и ее невозможно просто анализировать. Каждую эмульсию необходимо градуировать. Зависимостью от угла Δ в области малых углов можно пренебречь.

Так как интенсивность магнитного поля не настолько сильна, чтобы дать возможность для прямого измерения импульса релятивистской частицы, то мы обращаем внимание на более простую проблему, а именно на определение знака заряда частицы. Проблеме определения знака заряда посвящена работа [2]. Ее продолжает работа [3], в которой проводились измерения на импульсах, экспонированных космическими лучами при аналогичных условиях (что касается интенсивности магнитного поля) как и наш экспериментальный материал. Знак заряда определяется из разности угловых коэффициентов касательных трека в начале и в конце измеряемого отрезка трека. Примененный угловой метод менее точен и более трудоемок чем координатный метод и использование общего отклонения приводит к потере информаций о треке. Нет возможности исключить, или компенсировать однократное резерфордовское рассеяние. В работе [4] был разработан оригинальный способ определения знака заряда частицы. Авторы измеряли угловые отклонения вторичных частиц по отношению к трекам первичного пучка. Этот способ требует облучения эмульсии хорошо коллимированным первичным пучком частиц, относительно большой плотности (напр. в вакуумной камере ускорителя). Если измерение проводится только в начале и в конце измеряемого отрезка трека, то остаются затруднения с исключением однократного рассеяния.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗНАКОВ ВТОРЫХ РАЗНОСТЕЙ

Чтобы получать информацию равномерно по всему треку релятивистской частицы, мы обратили внимание на возможность определения знака заряда частицы из последовательности знаков вторых разностей при непрекрывающихся ячейках.

Если P представляет собой вероятность появления второй разности одного знака и $1-P$ вероятность обратного знака, то появление знаков в последовательности независмых имерений вторых разностей будет руководствоваться биномическим распределением. Для P вытекает из (1)

$$P = \int_0^\infty [2\pi(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)]^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{(D-\bar{D})^2}{2(\sigma_1^2+\sigma_2^2)}\right] \mathrm{d}D. \tag{4}$$

Предполагая, что $|\bar{D}| < (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$, можно интеграл заменить приблизительным выражением (5)

$$P = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{\bar{D}}{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}} \tag{5}$$

Если бы $\sigma_2 = 0$, то P было бы независимым от импульса частицы и для данного H оно было бы лишь функцией t (возрастающей как $t^{1/2}$). К этому случаю мы приближаемся при больших t и малых Δ.

Статистическая обработка измеряемых последовательностей знаков вторых разностей проводится по методу Вальда [6]. Конкретную форму метода мы употребляем согласно [7]. Главной особеностью этой проверки гипотезы является тот факт, что мы не устанавливаем заранее число измерений, но после каждого измерения мы решаем, является ли частица положительной, отрицательной, или находится ли измеренное множество знаков в области т. наз. индифференции. В последнем случае мы проводим дальнейшие измерения. Результат получаем с риском r, выбираемым таким образом, чтобы вероятность неправильного решения была меньше или равнялась r.

Мы выбираем два числа p_1 и p_2, для которых верно, что $0 < p_2 < p_1 < 1$ и альтернирующими гипотезами являются:

$$H_1\colon\ P > p_1$$
$$H_2\colon\ P < p_2.$$

После этого подсчитываем

$$k = \frac{\log(1 - p_1)/(1 - p_2)}{\log p_2/p_1 + \log(1 - p_1)/(1 - p_2)}, \tag{6}$$

$$s = \frac{\log(1 - r)/r}{\log p_2/p_1 + \log(1 - p_1)/(1 - p_2)}$$

и раподставим в выжения

$$L_1(n) = kn + S, \qquad L_2(n) = kn + S \tag{7}$$

для $n = 1, 2, 3, \ldots$

Из эксперимента получаются числа $S_1, S_2, \ldots S_n$ появления определенного знака при $1, 2, \ldots n$-ном измерении.

Область индифференции дана выражением

$$L_2(n) < S_n < L_1(n). \tag{8}$$

Если $S_n \geqslant L_1(n)$, то мы принимаем H_1, если $S_n \leqslant L_1(n)$, то мы принимаем H_2. Вероятность p_2 определяется градуировкой таким образом, что мы

для достаточно большой статистики определим одностороннюю оценку доверительного интервала вероятности данного знака второй разности P для вероятности $1 - r$. Величина p_2 представляет нижнюю границу этого интервала. Величины p_1 и p_2 лежат симметрически к 0,5. Следовательно, $p_1 = 1 - p_2$.

Теория дает среднее число измерений, необходимое для решения в пользу H_1 и H_2.

$$Ep_2(\bar{n}) = \frac{(1 - 2r)\log(1 - r)/r}{(2p_2 - 1)\log p_2/(1 - p_2)}. \tag{9}$$

Если обстоятельства после n_0 измерений препятствуют в продолжении работы (трек кончается взаимодействием или выходит из блока эмульсий), то можно принять H_1 для $Sn_0 > 1/2 \times [L_1(n_0) + L_2(n_0)]$. В обратном случае мы принимаем H_2. Такой прием, однако, увеличивает риск, но последним можно пренебречь для $n_0 \geqslant 3Ep_2(\bar{n})$.

ИЗМЕРЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

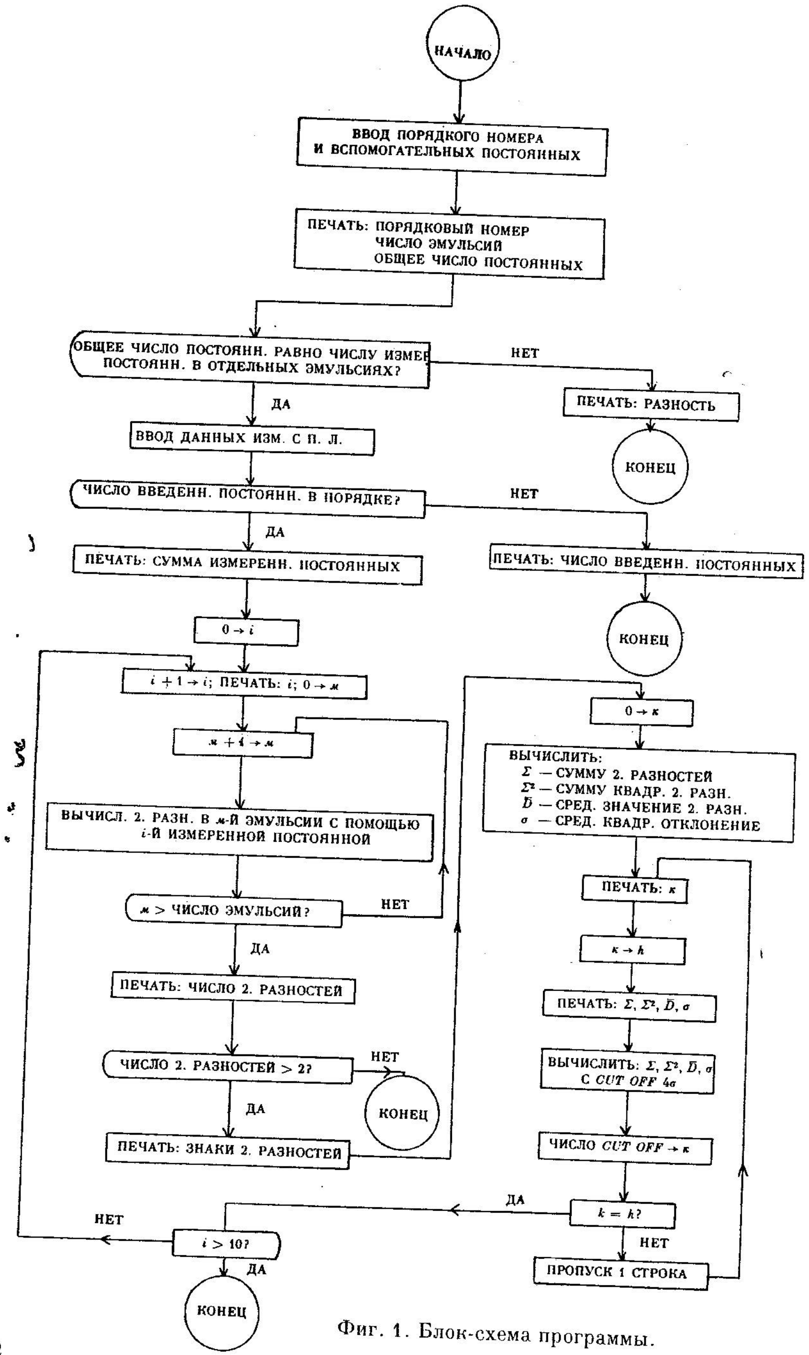
Измерения проводились на микроскопе KSM — 2 фирмы Цейсс с имерсионным объективом 50x. Установление трека по отношению к шкале проводится с помощью смещения поля зрения относительно неподвижного нитевого креста. Цена деления шкалы — 0,01μ.

Ионизацию мы определили посредством подсчитывания видимых промежутков между скоплениями зерен при смещении главного винта столика микроскопа по длине 0,5 см на каждом треке, с пересчетом числа промежутков на длину 100μ.

Так как одной из задач нашей работы было определение оптимальной ячейки, мы избрали основную длину ячейки 100μ. Этим, однако, новисились требования относительно масштаба расчетов, которые мы осуществили на вычислительной машине МИНСК — 2/22.

Входные данные вводились в машину с помощью пятипозиционной перфоленты в коде МИНСК — 2, или в международном телеграфном коде CCIT. При этом в первую зону мы вписали порядковый номер трека, номер эмульсии, в которой проводились измерения, общее число измеренных величин и числа измеренных величин в отдельных эмульсиях. Во вторую зону мы вписали отдельные измеренные величины.

На фигуре 1 упрощенный вид блоксхемы программы, в которой мы обращали большое внимание на точность и надежность результата. Этой цели мы добились с помощью трехкратной проверки перфорации и чтения перфокарты. Мы проверяли:



Фиг. 1. Блок-схема программы.

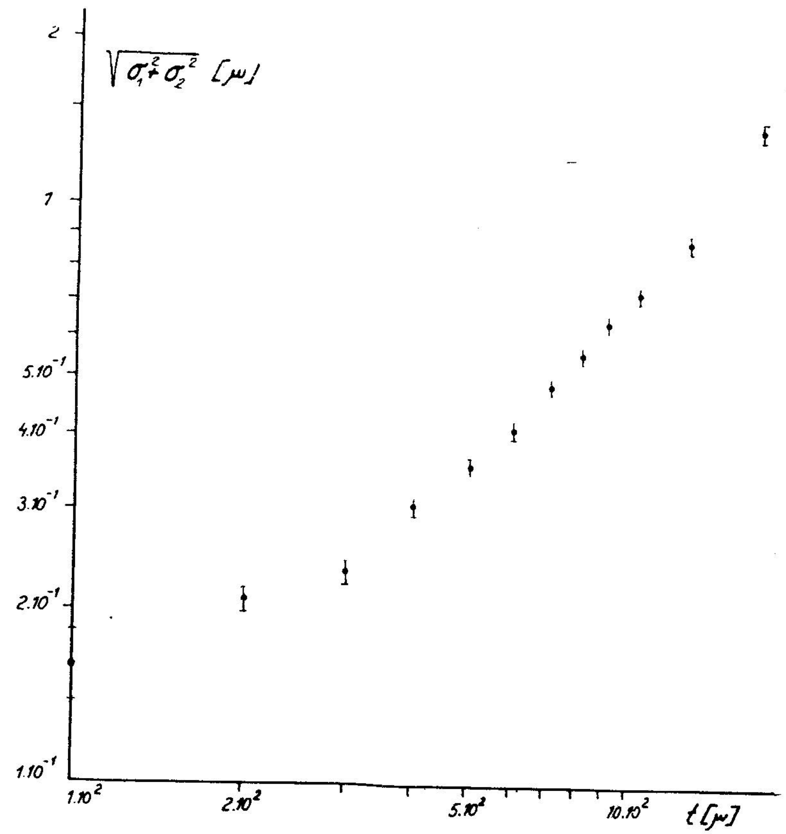
а. соотвествие суммы измеренных величин в отдельных эмульсиях общему числу измеренных величин

б. прочитала ли машина правильное число постоянных

в. соответствие контрольной суммы измеренных постоянных.

Информация из машины выводилась с помощью печатающего устойства ТВРМ.

Те же подсчеты проводились для десяти различных длин ячейки. Большие отклонения в величинах вторых разностей мы исключили с помощью т. наз. метода *cut off*, который мы применяли до тех пор, пока число неотрезанных вторых разностей не стало равняться повторно одинаковой величине.



Фиг. 2. Зависимость $\log(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$ от $\log t$.

Задачей этих измерений была оценка величины P и определение p_2 и p_1. Измерения проводились на 44 треках минимальной длины 2 см. Полная длина измеренного трека составляла 128 см. Подсчет вторых разностей проводился для длин ячеек от 100μ по 1000μ с шагом 100μ. Далее нами определялись средние значения вторых разностей и средние квадратичные отклонения.

Проверка нормальности распределения ансамбля вторых разностей и зависимости среднего значения вторых разностей $\bar{D}$ от длины ячейки t показала хорошее согласие с теоретическими требованиями.

На рисунке 2 в логарифмическом масштабе показана зависимость $(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$ от t. К теоретическому значению углового коэффициента 1,5 приближается зависимость для ячеек 1000μ.

Угловой коэффициент 1 получается в области значений от 700μ по 800μ. Результаты градуировки приведены в таблице 1.

Таблица 1

t [μ]	P	ΔP	P_2
1000	0,655	0,019	0,624
900	0,669	0,018	0,639
800	0,674	0,005	0,666
700	0,658	0,005	0,650
600	0,607	0,005	0,599

Значение P определялось из эксперимента. Значение ΔP подсчитывалось из формулы

$$\Delta P = \sqrt{\frac{P(1-P)}{N}}, \tag{10}$$

где N является полным числом вторых разностей. Значение p_2 нами определялось так, что для риска $r = 0{,}5$ принималось, что

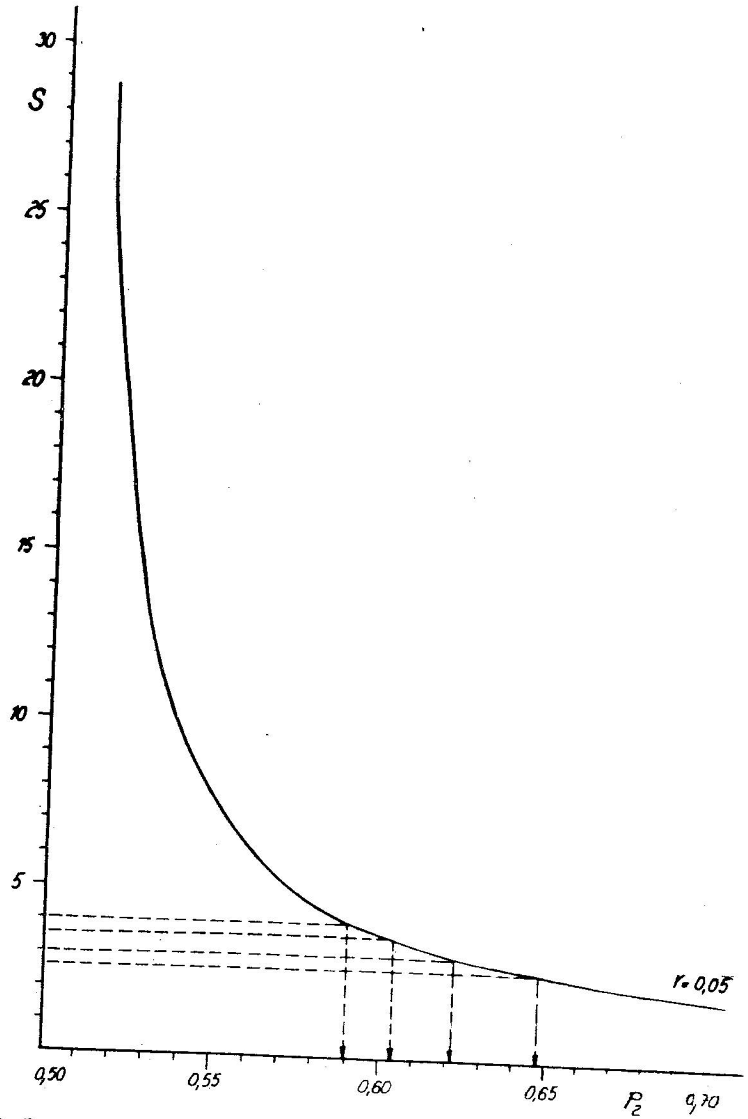
$$Pr(P > p_2) = 1 - r. \tag{11}$$

Для достаточно больших значений N имеет силу

$$p_2 = P - g\Delta P, \tag{12}$$

где $g = 1{,}65$.

Основные параметры, необходимые для последовательного анализа подсчитывались по формулам (6). Угловой коэффициент обеих прямых представляет 0,5 и величину параметра S можно определить из рисунка 3.



Фиг. 3. Зависимость p_2 от S для $r = 0{,}05$. Стрелки указывают интервалы значений, в которых последовательный анализ дает одинаковую процедуру.

Поскольку последовательность S_n имеет дискретные шаги, нам не нужны точные значения p_2, но нас устраивает знание соотвествующего интервала, указанного на рисунке 3. Результаты процедуры для всего ансамбля первичных треков приведены в таблице 2.

Таблица 2

t [μ]	$\bar{L}$ [cm]	Решенные треки	Нерешенные треки
1000	1,72	25	19
900	1,78	27	17
800	1,43	29	15
700	1,53	35	9
600	1,86	17	27

$\bar{L}$ является средней длиной трека, в конце которого мы приняли решение о знаке заряда. Эта характеристика не является полной, так как мы не смогли принять решение для всех треков. Ориентировочно это значение можно сравнить с величиной, подсчитанной из (9), которая представляет ≈ 2 см для $t = 700\ \mu$. Только в одном случае мы получили неправильный ответ, как будто частица первичного пучка имеет положительный знак.

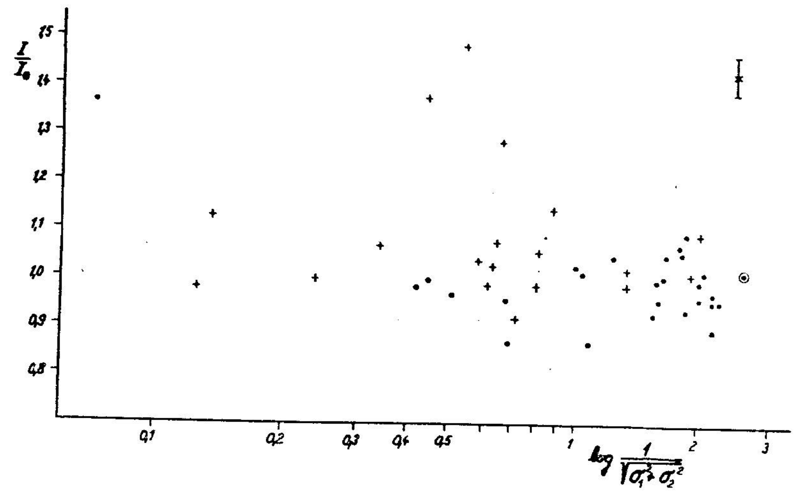
6. ИЗМЕРЕНИЯ НА ВТОРИЧНЫХ ТРЕКАХ

Измерения проводились на 60 вторичных треках. Помимо многократного рассеяния нами измерялись еще углы эмиссии и ионизации. Соответственно результатам измерений на первичных треках мы ограничились длинами ячейки $t = 700\ \mu$ и $800\ \mu$. Для обеих ячеек мы получили практически одинаковые результаты.

Основной ансамбль измеряемых треков был разделен процедурой определения знака заряда на три подгруппы: положительные частицы, отрицательные, и частицы, у которых не удалось определить знак заряда. Мы получили 19 положительных частиц, 28 отрицательных, и в 15 случаях мы не определили знака заряда. Из этих 15 треков 6 оканчивалось взаимодействием и остальные преждевременно выходили из блока эмульсий. В таких случаях, где это оказалось возможным, мы измеряли более длинные отрезки треков чем те, которые были необходимы для определения знака заряда. В единственном случае мы пришли к противоречию. Последовательность знаков вторых разностей давала сначала результат в пользу одного знака заряда, а в последствии в пользу обратного знака.

Чтобы проверить эффективность метода, мы должны обратить внимание в первую очередь на те треки, о которых у нас есть дополнительная информация. Это прежде всего упругие рассеяния первигных мезонов на протонах, удовлетворяющих соотвествующим критериям компланарности и углов эмисии. Далее, это те треки, которые на основании зависимости I/I_0 на $\log(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{-1/2}$ можно определить как протоны (смотри фиг. 4). Случаев упругого рассеяния оказалось 5. В трех случаях мы получили однозначный ответ в пользу отрицательного заряда вторичного мезона и в оставшихся двух случаях, обоих с относительно большим Δ, мы не получили окончательного решения. Треков, лежащих на протонной части кривой Штернгеймера (фиг. 4), было 4, и все дали положительные результаты. В пользу идентификации треков как протонов говорит также факт, что их угол с направлением первичного трека был меньше 10°.

Среди треков, для которых мы не получили окончательного решения, находилось 7 треков с углом $\Delta > 5°$. Это связано с фактом, что относительно круто идущие частицы с большей вероятностью вылетают из блока эмульсии, а также с тем, что здесь уже проявляется возрастание σ_2 с увеличением Δ. Другими словами, проявляется влияние т. наз. дисторсии фотографической эмульсии. Метод можно применить и в этом случае, но если мы хотим сохранить уровень риска, то мы должны вновь определить p_2. Наш экспериментальный материал не дает возможность для такой более подробной проверки.



Фиг. 4. Зависимость ионизации вторичных треков, деленной ионизацией первичного трека, от $\log(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{-1/2}$. В углу указаны ошибки измерения ионизации. Крестиками обозначаются положительные частицы, точками отрицательные. Кружок указывает первичный пучок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании экспериментального материала мы проверили в нашей работе возможность определения знака заряда релятивистской частицы из последовательности знаков вторых разностей с заранее данным уровнем риска.

Оказывается, что этот способ применим для эмульсионного материала, экспонированного в магнитном поле средней интенсивности. Это свидительствует одновременно о методической ценности такого облучения, которое относительно мало используется.

В заключение можно привести основные результаты нашей работы:

1. метод позволяет работать с треком, разбитым на отрезки, которые возникают при переходах из одного слоя эмульсии в другой;
2. поскольку метод относительно мало чувствителен на величину вероятности P, его можно сравнительно легко применить также для неоднородного малнитного поля;
3. деление трека на некоторое число отрезков снижает влияние однократного рассения но большой угол;
4. результат получается с количественной мерой риска совершить ошибку при определении знака заряда частицы;
5. число измерений, необходимое для получения окончательного результата для данной меры риска минимально.

Наконец мы хотим поблагодарить весь коллектив Кафедры ядерной физики факултета естественных наук Кошицкого университета, руководимый профессором Ю. Дубинским, а именно А. Колибарову, В. Силешову, М. Шабикову, М. Шпалекову, и А. Тота за помощь при проведении работ.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Barkas W. H., *Nuclear Research Emulsions.* Academic Press, New York 1693.
[2] Moyel J. E., Phil. Mag., Ser. 7, *41* (1950), 1058.
[3] Dilworth C. C. et al., Phil. Mag., Ser, 7, *41* (1950), 1032.
[4] Граменицкий И. М., Корбель З., Роб Л., Приб. техн. экспер. *1* (1961), 42.
[5] Van der Warden B. L., *Mathematische Statistik.* Springer Verlag, Berlin 1957.
[6] Вальд А., *Последобательный анализ.* ФИЗМАТ, Москва 1960.
[7] Fabián V., *Základní statistické metody.* Nakladatelství ČSAV, Praha 1963.

Поступило в Редакцию 13 июня 1967 г.

Katedra jadrovej fyziky
Prírodovedeckej fakulty UPJŠ,
Košice