

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.15.

ИЗУЧЕНИЕ ТРЕКОВ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ МЮОНОВ

Цель работы: изучение треков элементарных частиц в ядерной фотоэмульсии; измерение пробега и оценка энергии мюона, образующегося при $\pi^+ \rightarrow \mu^+$ распаде.

Литература: [3], §§ 13.1–13.4.; [30], гл. 7.

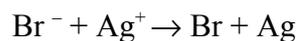
Приборы и принадлежности: микроскоп, препаратоводитель, эмульсия со следами распадов элементарных частиц, лампа подсветки.

ВВЕДЕНИЕ

Прямая регистрация следов заряженных частиц в фотоэмульсиях является одним из важнейших методов в современной ядерной физике и имеет обширную область применения.

В ядерных фотоэмульсиях, используемых при регистрации заряженных частиц, для увеличения чувствительности относительно содержание галоидного серебра по сравнению с желатиной примерно в 8 раз больше, чем в обычных эмульсиях, а толщина фотоэмульсии в 10 – 100 раз больше толщины обыкновенной эмульсии.

Треки заряженных частиц в фотоэмульсии образуются в результате следующих процессов. Частица, попадая в микрокристаллы AgBr, возбуждает электроны, образующие ионную связь в молекуле. Возбужденные электроны покидают отрицательный ион брома и переходят к положительному иону серебра; в результате образуются два нейтральных атома:



При обработке эмульсии, которая производится в темноте, из желатины удаляется бром, а оставшиеся атомы серебра образуют видимый трек.

До создания ускорителей единственным источником высокоэнергичных частиц были космические лучи. В космических лучах были выделены две компоненты: жесткая, проникающая через большие толщ свинца, включающая частицы большой массы, и мягкая, сильно поглощаемая свинцом, включающая легкие элементарные частицы, в первую очередь электроны. Частицы жесткой компоненты были названы мезонами, так как они имели массу, промежуточную между массами протона и электрона: $M \sim 200m_e$. Впоследствии были найдены другие частицы с массой $M \sim 300m_e$. Частицам с массой $M \sim 200m_e$ дали название мюоны (относятся к классу лептонов), а частицы с массой $M \sim 300m_e$ были названы π -мезонами (пионы) (относятся к классу адронов). Сейчас массы этих частиц измерены с довольно высокой точностью (до четвертого знака после запятой). Для выполнения данной работы достаточно использовать следующие приближенные значения: $M_\pi \sim 275m_e$ и $M_\mu \sim 207m_e$.

Схема регистрации π -мезонов показана на рисунке 4.15.1. Протоны, ускоренные до энергии $7 \text{ ГэВ} = 7 \times 10^9 \text{ эВ}$, выводятся из кольцевого ускорителя при помощи отклоняющего устройства и попадают в мишень, установленную в специальном помещении, где проводятся измерения. Под действием энергичных протонов в мишени происходят различные процессы, в частности образуются пучки π^+ - и π^- -мезонов. Эти пучки и регистрируются фотоэмульсией.

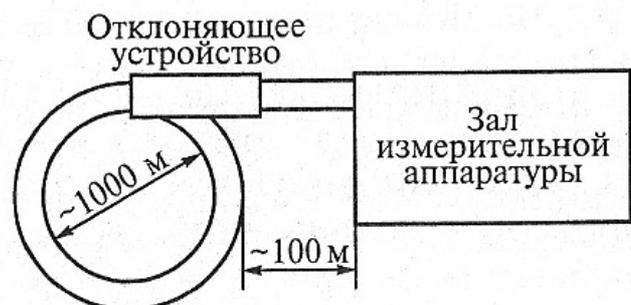


Рис. 4.15.1

В фотоэмульсии отрицательный пион имеет возможность близко подойти к ядру и поглощается им, что приводит к ядерному расщеплению. Осколки ядерного расщепления разлетаются во все стороны. Они образуют “звезду”, показанную на рисунке 4.15.2.а.

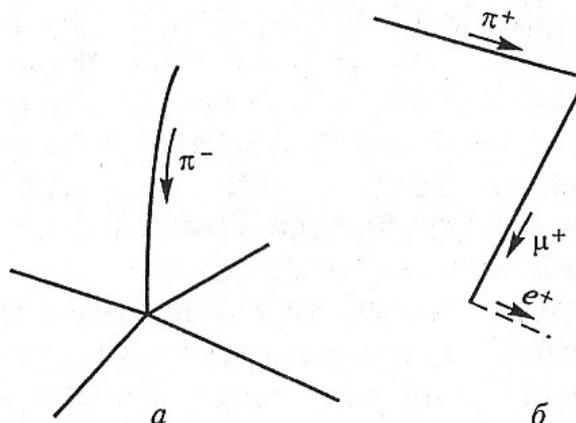
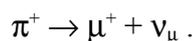
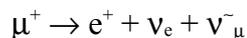


Рис. 4.15.2

В отличие от отрицательного пиона положительные пионы вследствие кулоновского отталкивания не могут приблизиться к положительно заряженным ядрам и распадаются с рождением мюона. На рисунке 4.15.2.б показана схема распада положительного пиона на мюон и нейтрино:



Мюон – нестабильная частица, поэтому через $\sim 10^6$ секунды он распадается с образованием позитрона e^+ , электронного нейтрино ν_e и мюонного антинейтрино $\bar{\nu}_{\mu}$:



Положительный пион оставляет в фотоэмульсии достаточно четкий след с характерным утолщением к концу вследствие уменьшения скорости движения. Возможно искривление трека (следа) в результате кулоновского взаимодействия с атомными ядрами. После излома трека (распад пиона) след обусловлен движением в фотоэмульсии положительного мюона. Нейтрино следа в эмульсии не оставляет.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В работе используются микроскоп и фотоэмульсия, облученная π -мезонами. Исследуемая эмульсия закреплена на предметном столике (3) микроскопа (рис. 4.15.4) и может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью винтов препаратодителя (4). Для того чтобы сфокусировать микроскоп на слой эмульсии, необходимо винтом грубой наводки (1) опустить тубус на расстояние нескольких миллиметров от фотопластинки. При этой операции необходимо соблюдать осторожность, чтобы не продавить эмульсию. Далее следует вести поиск следов π - μ -распада на различной глубине с помощью микрометрического винта (2). Просматривать пластинку удобно полосами от одного края к другому, перемещая ее на столике с помощью винтов препаратодителя. Ширина этих полос должна быть равна диаметру поля зрения объектива. Обнаружив π - μ -распад, обязательно убедитесь, что трек мюона не выходит за пределы эмульсии. Рекомендуется найти и обработать несколько треков π - μ -распада.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Частица входит в эмульсионный слой под небольшим углом к его поверхности, как это показано на рисунке 4.15.3, где R – длина пробега, $R_{гор}$ – горизонтальная проекция трека, h – вертикальная.

Поле зрения микроскопа в большинстве случаев меньше длины пробега частицы, поэтому измерение горизонтальной проекции следа $R_{гор}$ производится путем последовательных фокусировок, производимых одновременно с перемещением пластинки относительно объектива. На столике имеются две шкалы, при помощи которых определяются координаты найденного распада. При измерении $R_{гор}$ удобно пользоваться опорными точками, которые выделяются на треке (утолщения, сужения и т.д.). Если след частицы не выходит за границы поля зрения микроскопа, то $R_{гор}$ определяется разностью координат начала и конца трека, умноженной на цену деления окулярного микрометра (для объектива с восьмикратным увеличением 8^x – 12,5 мкм, с двадцатикратным увеличением – 5 мкм).

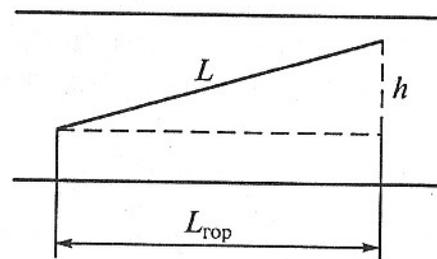


Рис. 4.15.3

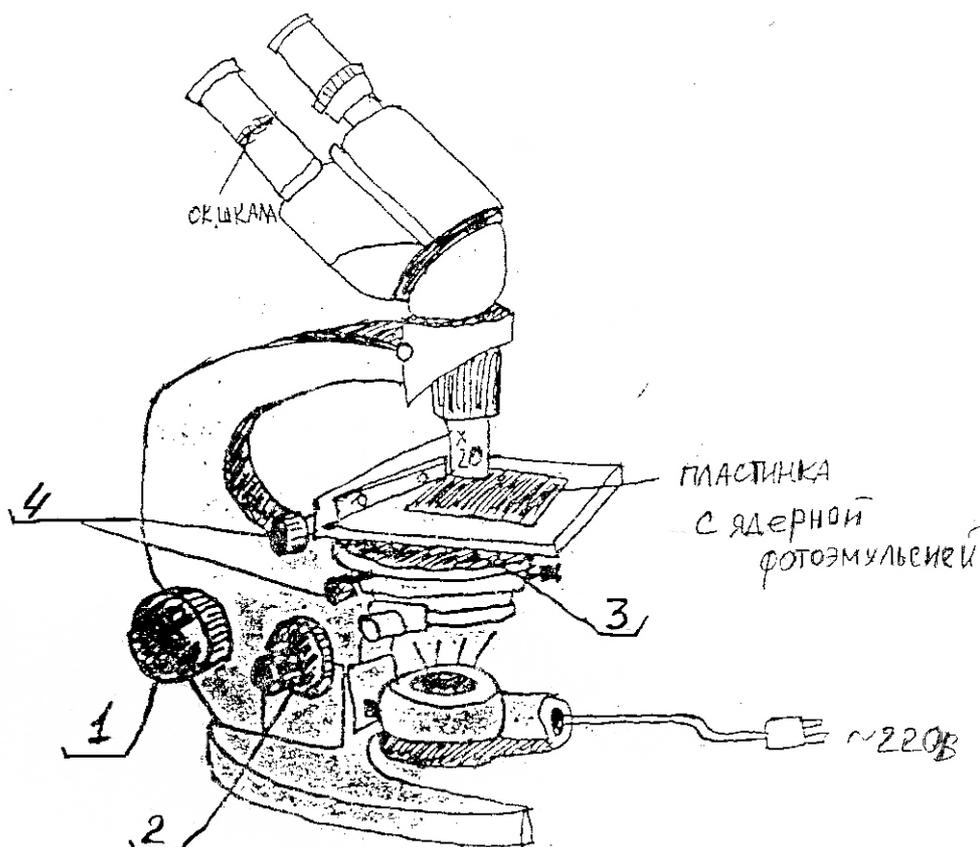


Рис. 4.15.4

Высота h измеряется с помощью микрометрического винта (2). Для этого надо сфокусировать объектив на начальную точку трека и зафиксировать ее координаты на шкале винта. Затем то же самое следует сделать для конечной точки трека. Разность отсчетов по шкале микрометрического винта, умноженная на цену деления, будет кажущейся высотой $h_{каж}$ (из-за преломления света кажущаяся толщина в n раз меньше истинной, где n – показатель преломления эмульсии). Кроме того, необходимо учесть

искажения трека, которые возникают при обработке эмульсий: дисперсия, усадка и др. Особенно сильно влияет на кажущуюся высоту усадка. Общая истинная длина проекции на вертикальную ось будет определяться уравнением

$$h = \chi n h_{\text{каж}}, \quad (1)$$

где χ – коэффициент усадки, n – показатель преломления эмульсии ($n=1,52$).

Коэффициент усадки определяется из отношения начальной толщины эмульсии ($d_0 = 400$ мкм) к толщине d после обработки, которая определяется поочередной фокусировкой на верхнюю и нижнюю поверхности эмульсии:

$$c = \frac{d_0}{d}, \quad d = nk(N_2 - N_1) \quad (2)$$

Здесь k – цена деления микрометрического винта, N_1 и N_2 – соответствующие значения по шкале микрометрического винта при фокусировке на верхнюю и нижнюю поверхности эмульсии.

Теперь можно определить длину пробега:

$$R = \sqrt{R_{\text{гор}}^2 + h^2} = \sqrt{R_{\text{гор}}^2 + (\chi n h_{\text{каж}})^2}. \quad (3)$$

Первоначальная кинетическая энергия мюона находится по эмпирической формуле:

$$T_x = \alpha \left(\frac{m_x}{m_p} \right)^{1 - \epsilon} Z^{2\epsilon} \cdot R^{\epsilon}, \quad (4)$$

где x – вид частицы, T – кинетическая энергия частицы (МэВ), R – длина пробега (мкм), m – масса протона, m_x – масса частицы, Z – заряд частицы (относительно элементарного заряда). Значения коэффициентов α и ϵ зависят от свойств эмульсии. Для эмульсий, используемых в данной работе, $\alpha = 0,25$ и $\epsilon = 0,58$.

Задание 1. Измерение длины пробега положительного мюона

Перед выполнением работы расположите пластинку так, чтобы ее стороны были параллельны направляющим столика микроскопа.

1. Найдите на фотоэмульсии след $\pi^+ - \mu^+$ -распада. Перед проведением измерений убедитесь, что мюон остановился в эмульсии. Зарисуйте наблюдаемую картину.

2. Последовательно сфокусировав объектив на верхнюю и нижнюю поверхности эмульсии, определите коэффициент усадки χ по формуле (2).

3. Пользуясь описанной выше методикой, определите вертикальную h и горизонтальную $R_{\text{гор}}$ проекции трека мюона.

4. По формуле (3) рассчитайте длину пробега мюона R .

5. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

d_0 , мкм	d , мкм	χ	$h_{\text{каж}}$, мкм	h , мкм	$R_{\text{гор}}$, мкм	R , мкм

Задание 2. Оценка энергии положительного мюона.

Пользуясь формулой (4), рассчитайте энергию, с которой испускается мюон при $\pi^+ - \mu^+$ -распаде.

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Какие типы ускорителей заряженных частиц вам известны?
2. Какие методы регистрации элементарных частиц применяются в ядерных исследованиях?

3. Как было открыто нейтрино? Каковы характеристики этой частицы?
4. Что такое космические лучи?
5. Как классифицируются элементарные частицы в зависимости от типов взаимодействий, в которых они участвуют?
6. Перечислите все лептоны. Каковы их времена жизни, масса, спин?
6. Перечислите все известные кварки. Каковы их спин, заряды, массы?
7. Каков кварковый состав: протона, нейтрона, π^0 , π^- и π^+ мезонов?
8. Участвуют ли адроны в слабом взаимодействии?
9. Какие типы взаимодействий обуславливают следующие реакции:
 $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$; $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$; ${}_6\text{C}^{14} \rightarrow {}_7\text{N}^{14} + {}_{-1}\text{e}^0$; ${}_1\text{p}^1 + {}_3\text{Li}^7 \rightarrow {}_2\text{He}^4 + {}_2\text{He}^4$?