

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

С.К. Камзолов, С.М. Новиков

**ФИЗИКА
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ГЛАВЫ ФИЗИКИ
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

**ПОСОБИЕ
по выполнению лабораторной работы ЭЧ-1
«Определение массы и времени жизни
элементарных частиц»**

*для студентов I-III курсов
всех направлений и специальностей
всех форм обучения*

Москва - 2016

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

Кафедра физики

С.К. Камзолов, С.М. Новиков

ФИЗИКА
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ГЛАВЫ ФИЗИКИ
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ПОСОБИЕ

по выполнению лабораторной работы ЭЧ-1
**«Определение массы и времени жизни
элементарных частиц»**

*для студентов I-III курсов
всех направлений и специальностей
всех форм обучения*

Москва - 2016

ББК 53
К 18

Рецензент: канд. физ.-мат. наук., доц. Куколева А.А.

Камзолов С.К., Новиков С.М.

К18 Физика. Дополнительные главы физики. Физические основы современных технологий. Пособие по выполнению лабораторной работы ЭЧ-1 «Определение массы и времени жизни элементарных частиц». – М.: МГТУ ГА, 2016 г. – 12 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочими программами учебных дисциплин «Физика», «Дополнительные главы физики» и «Физические основы современных технологий» по Учебным планам для студентов I-III курсов всех направлений и специальностей всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 23.12.15 г. и методического совета 19.01.16 г.

Подписано в печать 23.03.16 г.

Печать офсетная
0,69 усл.печ.л.

Формат 60x84/16
Заказ № 48

0,4 уч.-изд. л.
Тираж 80 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20
Редакционно-издательские услуги ООО «Имидж-студия Арина»
127051 Москва, М. Сухаревская пл., д. 2/4 стр.1

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЭЧ-1
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

1. Цель работы

На примере реакций с участием элементарных частиц познакомиться с применением фундаментальных законов сохранения в релятивистском случае. По фотографиям полученных в пузырьковой камере треков частиц, участвующих в реакции, рассчитать их характеристики.

2. Подготовка к работе

Изучите теоретический материал по лекциям или учебнику [1, 2]: преобразования Лоренца и следствия из них, энергия покоя, полная энергия частицы, релятивистский импульс, законы сохранения энергии и импульса. Ознакомьтесь с принципом измерений характеристик частиц по методическому описанию. Подготовьте ответы на вопросы из раздела 7 данного описания.

Данная лабораторная работа выполняется каждым студентом индивидуально. Номер задания соответствует порядковому номеру студента в списке подгруппы. Оформите проект отчета по лабораторной работе. Подготовьте для работы с фотографиями треков частиц транспортир и линейку с миллиметровой шкалой.

3. Краткая теория

Фундаментальные законы сохранения (полной энергии, импульса, заряда, спина и другие) наиболее эффектно проявляются в реакциях с участием частиц, которые относят к элементарным. Как правило, частицы, участвующие в реакции, имеют скорости, сравнимые со скоростью света. Кроме того, для суммы масс покоя участников реакции не выполняется закон ее сохранения. Поэтому, при расчете таких реакций необходимо использовать соответствующие законы и формулы релятивистской механики.

Напомним, что опираясь на постулаты специальной теории относительности, А.Эйнштейн показал, что соотношения между физическими величинами, измеряемыми в различных инерциальных системах отсчета (ИСО), в частности, выглядят следующим образом:

$$\tau_{\text{лаб}} = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1)$$

где τ_0 – промежуток времени между двумя событиями, произошедшими с частицей и измеренный в ИСО, которая движется вместе с частицей, т.е. в которой частица покоится (в собственной ИСО), $\tau_{\text{лаб}}$ – промежуток времени между теми же событиями, но измеренный в лабораторной ИСО, v – скорость частицы в лабораторной ИСО, c – скорость света;

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{и} \quad \vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (2)$$

где E – полная энергия движущейся в лабораторной ИСО частицы, \vec{p} – ее импульс, E_0 – энергия покоя частицы, m_0 – масса покоя частицы. Опираясь на эти соотношения можно вывести полезные для расчетов формулы взаимосвязи энергии и импульса:

$$E = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + (pc)^2} \quad \text{или} \quad E = \sqrt{E_0^2 + (pc)^2}, \quad (3)$$

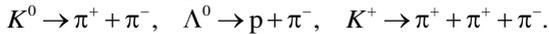
$$p = \frac{1}{c} \sqrt{T(2m_0 c^2 + T)}, \quad \text{или} \quad p = \frac{1}{c} \sqrt{T(2E_0 + T)} \quad (4)$$

$$v = \frac{pc^2}{E} \quad (5)$$

где T – кинетическая энергия частицы.

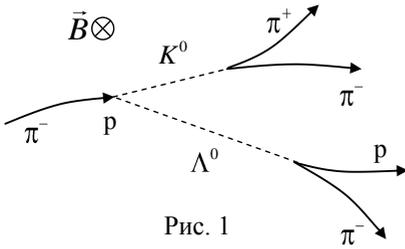
4. Методика проведения эксперимента

В данной лабораторной работе изучаются распады K -мезонов и Λ^0 -гиперонов, сопровождающиеся рождением π -мезонов (пионов) и протонов:



Материалом для работы служат снимки треков, полученные в пузырьковой камере, в рабочем объеме которой находится перегретая жидкость (т.е. при температуре выше температуры кипения). Такое состояние достигается путем кратковременного (на доли секунды) снижения температуры кипения жидкости путем уменьшения ее давления. Движущаяся в пузырьковой камере заряженная частица ионизирует на своем пути молекулы жидкости. Ионы становятся центрами интенсивного парообразования. В результате, вдоль траектории заряженной частицы появляются микропузырьки пара, последовательность которых образует след частицы – трек. Образовавшиеся треки фотографируют и исследуют. Нейтральные же частицы очень слабо взаимодействуют с молекулами среды, поэтому практически не образуют треков. Об их траекториях судят по точкам рождения и распада. Если в пузырьковой камере создать магнитное поле, то на движущуюся заряженную частицу будет действовать сила Лоренца, направление которой зависит от знака заряда. Поэтому, знак заряда частицы легко устанавливается по кривизне треков. Нейтральные частицы, естественно, в магнитном поле движутся прямолинейно.

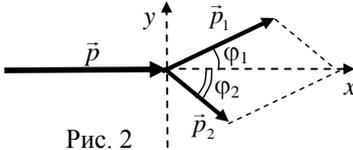
На рис. 1 показан известный случай образования двух нейтральных частиц (K^0 -мезона и Λ^0 -гиперона) в результате взаимодействия π^- -мезона с покоящимся протоном $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$, а затем распад каждой из образовавшихся



частиц на две с зарядами разных знаков. Пунктирными линиями обозначены невидимые траектории движения K^0 -мезона и Λ^0 -гиперона.

В первом задании данной работы изучается аналогичная реакция, но в отсутствии магнитного поля. Для определения энергии покоя и времени жизни одной из распадающихся нейтральных частиц (K^0 -мезона или Λ^0 -гиперона) достаточ-

но измерить длины пробега участников реакции и углы разлета продуктов распада относительно направления полета исходной частицы (φ_1 и φ_2). На рис. 2



приведена векторная диаграмма распада нейтральной частицы (например, K^0 -мезона из рис. 1), иллюстрирующая закон сохранения импульса $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$, где \vec{p} – импульс распадающейся нейтральной частицы, \vec{p}_1 и \vec{p}_2 –

импульсы продуктов распада. В проекциях на выбранные оси координат в данном случае этот закон имеет вид:

$$\begin{cases} 0x: & p = p_1 \cos \varphi_1 + p_2 \cos \varphi_2 \\ 0y: & 0 = p_1 \sin \varphi_1 - p_2 \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (6)$$

Поскольку продуктами распада в исследуемом случае являются заряженные частицы, то их импульсы изменяются во время полета в результате потерь энергии на ионизацию окружающих атомов и молекул. Между этими потерями и длиной пробега заряженных частиц до остановки имеется определенная взаимосвязь. Экспериментально установленные зависимости длины пробега π -мезонов и протонов от их начальной кинетической энергии представлены в виде графиков в приложениях 1 и 2 к этой работе. По этим графикам определяются значения кинетических энергий частиц, треки которых находятся в пределах фотографии. Дальнейшие расчеты характеристик других участников реакции производятся с помощью формул (3) и (4), а также законов сохранения полной энергии и импульса.

Определение собственного времени жизни нейтральной частицы основано на измерении длины ее пробега l , т.е. расстояния, пройденного частицей от момента образования до ее распада. Ввиду отсутствия потерь на взаимодействие с молекулами среды, скорость v нейтральной частицы, не меняется во вре-

мя полета. Поэтому, для времени жизни такой частицы в лабораторной системе отсчета $\tau_{\text{лаб}}$ справедлива формула

$$\tau_{\text{лаб}} = \frac{l}{v}.$$

С учетом релятивистских соотношений (1), (2) и (5) можно получить расчетную формулу для определения собственного времени жизни частицы

$$\tau_0 = \tau_{\text{лаб}} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{l}{v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{lE}{pc^2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{lE_0}{pc^2}. \quad (7)$$

5. Порядок выполнения работы

Получите у лаборанта фотографии треков частиц (в соответствии с номером варианта задания).

Задание 1. Изучение распада нейтральных частиц

На фотографии треков своего варианта найдите распад нейтральной частицы (Λ^0 -гиперона для нечетных вариантов, или K^0 -мезона для четных). Наложив на фотографию лист достаточно прозрачной бумаги, отметьте точку рождения нейтральной частицы, точку ее распада и следы продуктов ее распада. Проведите пунктирную линию полета нейтральной частицы от точки рождения до точки распада. Продлите ее между треками продуктов распада. Измерьте длину пробега нейтральной частицы l и длину трека одного из двух продуктов ее распада l_1 , заканчивающегося в пределах фотографии (с учетом масштаба, указанного на фотографии). Измерьте углы разлета продуктов распада нейтральной частицы (см. рис. 2). Полученные результаты запишите в таблицы 1 и 2.

Задание 2. Изучение распада K^+ -мезона

Зарисуйте треки частиц вашего варианта на лист бумаги по методике, описанной выше в задании 1. Отметьте на рисунке трек K^+ -мезона. Продлите его пунктирной линией за точку распада, между треками продуктов распада. Выберите систему координат по аналогии с рис. 3. Измерьте длину двух из трех треков пионов, заканчивающихся в пределах фотографии (учитывая масштаб, указанный на фотографии). Измерьте углы разлета всех трех пионов. Данные запишите в таблицу 3.

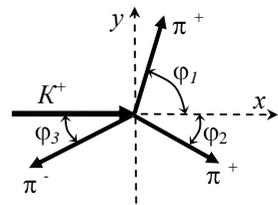


Рис. 3.

6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта

Задание 1. Изучение распада нейтральных частиц

1. По длине трека одного из двух продуктов распада l_1 с помощью соответствующего графика (приложения 1 или 2) определите ее начальную кинетическую энергию T_1 (в МэВ).

Замечание: при расчетах в данной работе удобно использовать размерности величин, принятые в экспериментальной ядерной физике, где энергию частиц измеряют в МэВ ($1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$).

2. С помощью формулы (4) рассчитайте величину произведения p_1c , имеющую размерность энергии, т.е. МэВ (это удобно для дальнейших расчетов). Необходимое значение энергии покоя частицы E_{01} приведено в таблице 4. Полученные результаты запишите в таблицу 1.

3. Запишите в отчет по лабораторной работе систему уравнений (6) так, чтобы вместо импульсов p_i использовались произведения $p_i c$. Решите полученную систему уравнений относительно произведения $p c$ для распавшейся частицы и $p_2 c$ для второго продукта распада. Полученные результаты запишите в таблицу 1.

4. Рассчитайте полную энергии продуктов распада: $E_1 = T_1 + E_{01}$, а E_2 по формуле (3). Полную энергию распавшейся нейтральной частицы E определите на основании закона ее сохранения. Полученные результаты запишите в таблицу 1.

5. С помощью формулы (3) рассчитайте энергию покоя распавшейся частицы E_0 (для K^0 или Λ^0). Полученный результат запишите в таблицу 2. Туда же перепишите из таблицы 1 значение $p c$ для этой частицы.

6. Вычислите собственное время жизни K^0 -мезона или Λ^0 -гиперона (формула 7). При расчетах необходимо учесть, что величина $p c$ была определена в единицах МэВ. Для получения правильного результата в секундах формулу (7) (для согласования размерностей) необходимо преобразовать к виду

$\tau_0 = \frac{l}{c} \cdot \frac{E_0}{(p c)}$, где E_0 и $(p c)$ оставьте с размерностью МэВ (которая сократится), а длину пробега частицы l и скорость света $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ используйте в СИ. Заполните таблицу 2.

7. Сравните полученные величины энергии покоя E_0 и собственного времени жизни частицы τ_0 со значениями в справочнике (или через интернет) и запишите в отчет выводы.

Задание 2. Изучение распада K^+ -мезона

1. По длине треков π -мезонов с помощью соответствующего графика из приложения 1 определите их начальные кинетические энергии $T_{\pi 1}$ и $T_{\pi 2}$ (в МэВ), а затем рассчитайте произведения $p_1 c$ и $p_2 c$ по формуле (4). Необходимое для этого значение энергии покоя $E_{0\pi}$ приведено в таблице 4. Полученные результаты запишите в таблицу 3.

2. Запишите в отчет закон сохранения импульса для исследуемой реакции в проекциях на выбранные оси координат аналогично (6) так, чтобы вместо импульсов p_i использовались произведения $p_i c$, имеющие размерность энергии, т.е. МэВ (как и в первом задании это удобно для дальнейших расчетов). Решите полученную систему уравнений относительно неизвестных произведений $p c$ и $p_3 c$. При расчетах учтите замечание к п. 1 в первом задании. Кроме того, в случае получения небольшого отрицательного значения величины $p c$ для K^+ -мезона примите, что в пределах ошибки измерения она равна нулю, т.е. перед распадом K^+ -мезон практически остановился.

3. Рассчитайте полные энергии пионов $E_{\pi 1}$ и $E_{\pi 2}$ по формуле $E_{\pi} = T_{\pi} + E_{0\pi}$, а $E_{\pi 3}$ по формуле (3). Полученные результаты запишите в таблицу 3.

4. Определите полную энергию K^+ -мезона на основании закона сохранения энергии (в МэВ), а затем с помощью формулы (3) рассчитайте его энергию покоя E_{K0} . Полученные результаты запишите в таблицу 3.

5. Сравните полученную величину энергии покоя E_{K0} со справочным значением (через интернет) и запишите в отчет выводы.

Таблица 1

Частица (π^- , π^+ , p , K^0 или Λ^0)	Углы разлета	Длина пробега, м	Кинетическая энергия, МэВ	pc , МэВ	Энергия, МэВ
	$\varphi_1 =$	$l_1 =$	$T_1 =$	$p_1c =$	$E_1 =$
	$\varphi_2 =$	-		$p_2c =$	$E_2 =$
				$pc =$	$E =$

Таблица 2

Длина пробега l , м	pc , МэВ	Энергия покоя E_0 , МэВ	Время жизни, с

Таблица 3

Угол вылета пиона	Длина пробега пиона, см	Кинетиче- ская энергия пиона, МэВ	Для пионов pc , МэВ	Для K^+ - мезона pc , МэВ	Энергия пиона, МэВ	Энергия K^+ - мезона, МэВ	Энергия покоя K^+ - мезона, МэВ
$\varphi_1 =$	$l_1 =$	$T_{\pi 1} =$	$p_1c =$	$pc =$	$E_{\pi 1} =$	$E_K =$	$E_{K0} =$
$\varphi_2 =$	$l_2 =$	$T_{\pi 2} =$	$p_2c =$		$E_{\pi 2} =$		
$\varphi_3 =$	-	-	$p_3c =$		$E_{\pi 3} =$		

Таблица 4

Частица	Энергия покоя
протон (p)	$E_{0p} = m_{0p}c^2 = 938,3$ МэВ
пион (π^+ или π^-)	$E_{0\pi} = m_{0\pi}c^2 = 139,6$ МэВ

7. Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Что такое трек элементарной частицы и как он образуется в пузырьковой камере?
2. Почему одни элементарные частицы образуют треки, а другие нет?
3. Какова форма треков частиц, если на них действует магнитное поле?
4. Почему при исследовании элементарных частиц необходимо использовать формулы теории относительности?
5. Запишите формулу для определения релятивистской кинетической энергии.
6. Как по известной кинетической энергии частицы можно определить ее импульс в релятивистском и в нерелятивистском случаях?
7. В чем отличие собственной системы отсчета от лабораторной системы отсчета?
8. В какой системе отсчета время жизни частицы минимально?
9. Какая единица измерения энергии используется в ядерной физике?
10. Может ли измениться суммарная масса покоя элементарных частиц, участвующих в реакции?

8. Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Академия, 2008-2014 г.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. – М.: Наука (или другое), 2008-2014 г.

