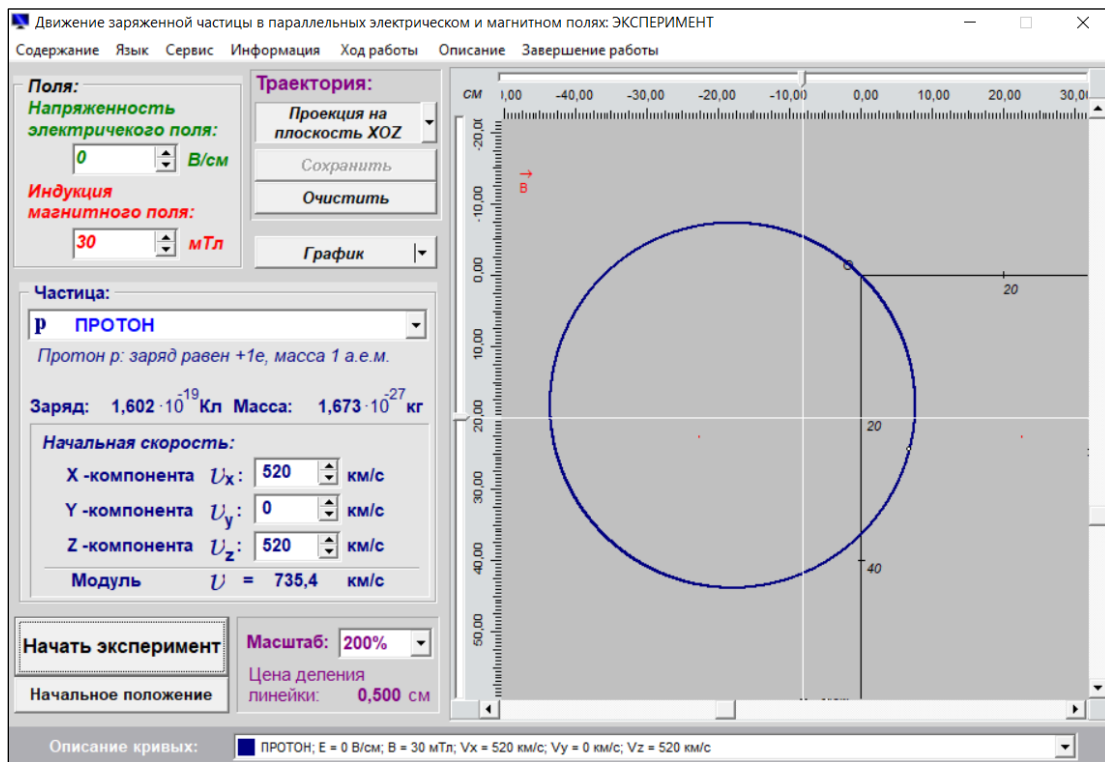


Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



А.Г. Рипп, В.В. Довгаленко

Радиус вращения частиц в параллельных полях

Учебное пособие по общей физике
для студентов технических
и естественно-научных специальностей

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 53.08 (075.8)

Р 537

Рецензент:

М.Н. Белая – кандидат технических наук, доцент

Рипп А.Г.

Р 537 Радиус вращения частиц в параллельных полях: учебное пособие по общей физике / А.Г. Рипп, В.В. Довгаленко. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 14 с.

Учебное пособие разработано преподавателями кафедры «Физика» СевГУ и предназначено для студентов 1 и 2 курсов технических и естественно-научных специальностей, выполняющих лабораторные работы по дисциплинам: «физика» и «физический практикум». В пособии студентам предлагается познакомиться с методами теоретического исследования электростатических полей и экспериментальной проверки теоретических зависимостей потенциала, созданного заряженными телами, от координат. Лабораторная установка, на которой предлагается провести эксперименты, виртуальная.

Пособие содержит краткий теоретический материал, описание лабораторной установки, порядок выполнения лабораторной работы и методы оценки погрешности измерений. Материал изложен подробно и в доступной форме. Для студентов, желающих получить больше информации, в конце пособия приводится список литературы.

УДК 53.08 (075.8)

Учебное пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Физика», протокол № 6 от 31 января 2018 г.

Работа 48А. Радиус вращения частиц в параллельных полях

Цель работы

Изучение зависимости радиуса вращения заряженной частицы в параллельных, однородных и стационарных электрическом и магнитном полях от характеристик полей и частицы, а также измерение удельного заряда частицы.

1. Краткая теория

1.1. Основные понятия

Электрическое поле – это область пространства, в которой на заряженные объекты действует сила. Основной количественной характеристикой электрического поля является *напряжённость поля* $\mathbf{E}$, которая определяет силу, действующую в электрическом поле на точечный заряд:

$$\mathbf{F}_э = q\mathbf{E}.$$

Здесь q – величина заряда, силу $\mathbf{F}_э$ будем называть *электрической силой*.

Магнитное поле – это область пространства, в которой на магнитные объекты действует сила или момент сил. Основной количественной характеристикой магнитного поля является *магнитная индукция* $\mathbf{B}$, определяющая силу или момент сил, действующие на элементарные магнитные объекты. Есть несколько типов элементарных магнитных объектов. Одним из них является движущийся точечный заряд. На него в магнитном поле действует сила, которая называется *силой Лоренца* $\mathbf{F}_л$ и которая связана с магнитной индукцией $\mathbf{B}$ формулой

$$\mathbf{F}_л = q[\mathbf{v}\mathbf{B}].$$

Здесь q – величина заряда, $\mathbf{v}$ – его скорость.

Векторы $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$ – это *локальные* характеристики электрического и магнитного полей, они определяют свойства полей в каждой отдельной точке. Математически это означает, что $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$ – функции координат точки поля: $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y, z)$, $\mathbf{B} = \mathbf{B}(x, y, z)$. В частном случае $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$ могут не зависеть от координат точки поля. Это значит, что в любой точке электрического поля $\mathbf{E}$ – один и тот же вектор, а в любой точке магнитного поля $\mathbf{B}$ – один и тот же вектор. Такие поля называются *однородными*.

Естественно, свойства любых полей, как и всё на свете, изменяются с течением времени. С точки зрения математики это означает, что $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$ – функции не только координат, но и времени: $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y, z, t)$, $\mathbf{B} = \mathbf{B}(x, y, z, t)$. В частном случае, $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$ могут не зависеть от времени. Такие поля называются *стационарными*, то есть неизменными.

В данной лабораторной работе вам предлагается исследовать движение заряженной частицы (её можно считать *точечным* зарядом) в однородных и стационарных электрическом и магнитном полях¹. Математически это означает, что $\mathbf{E} = \text{const}$ и $\mathbf{B} = \text{const}$. Эти два поля накладываются друг на друга, то есть существуют в одной и той же области пространства и образуют *одно поле*. Кроме того, векторы $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$ сонаправлены (параллельны) – такие поля называются *параллельными*.

¹ В реальности ни однородных, ни стационарных полей в природе нет. Тем не менее, реальное поле в некоторой *конечной* области пространства и на протяжении некоторого *конечного* промежутка времени вполне может быть и однородным, и стационарным.

Выберем систему координат. Направим ось OY по полю, то есть в направлении векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{B}$. Тогда оси OX и OZ лежат в плоскости, перпендикулярной полю. Электрическая сила $\mathbf{F}_3 = q\mathbf{E}$ направлена вдоль оси OY , а магнитная сила (сила Лоренца) $\mathbf{F}_л = q[\mathbf{v}\mathbf{B}]$ перпендикулярна магнитной индукции $\mathbf{B}$ и оси OY , следовательно, она лежит в плоскости XOZ . Поэтому движение частицы в направлении оси OY (в направлении поля) определяется *только электрической силой* и не зависит от магнитного поля. Напротив, движение частицы в плоскости XOZ (перпендикулярно полю) определяется *только силой Лоренца* и не зависит от электрического поля.

1.2. Движение частицы в направлении поля

Движение по полю – это движение вдоль оси OY . В этом направлении на частицу действует электрическая сила $F_3 = qE$. Согласно второму закону Ньютона, она создаёт ускорение

$$a_y = \frac{q}{m} E, \quad (1.1)$$

где m – масса частицы, а отношение $\frac{q}{m}$ называется *удельным зарядом* частицы. Так как $E = \text{const}$, то и ускорение частицы a_y – тоже постоянное. Это значит, что движение частицы вдоль поля – *равноускоренное*, и оно описывается уравнением:

$$y(t) = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}.$$

1.3. Движение частицы перпендикулярно полю

Рассматривая движение частицы как два независимых движения – вдоль поля и перпендикулярно полю, мы можем скорость частицы разложить на две составляющие (два взаимно перпендикулярных вектора):

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_y + \mathbf{v}_\perp.$$

Вектор $\mathbf{v}_y$ коллинеарен оси OY (параллельная составляющая скорости), а вектор $\mathbf{v}_\perp$ лежит в плоскости XOZ (перпендикулярная составляющая).

В плоскости XOZ частица движется под действием силы Лоренца $\mathbf{F}_л = q[\mathbf{v}_\perp \mathbf{B}]$. Эта сила перпендикулярна скорости частицы $\mathbf{v}_\perp$. Поэтому она не может изменить скорость частицы по величине (по модулю), а меняет её только по направлению. Ускорение, которое создаёт сила Лоренца, тоже перпендикулярно скорости. Такое ускорение называется *нормальным* и обозначается a_n . Из второго закона Ньютона следует:

$$\mathbf{a}_n = \frac{q}{m} [\mathbf{v}_\perp \mathbf{B}].$$

Векторы $\mathbf{v}_\perp$ и $\mathbf{B}$ перпендикулярны друг другу, поэтому

$$a_n = \frac{q}{m} v_\perp B.$$

С другой стороны, нормальное ускорение связано со скоростью частицы $\mathbf{v}_\perp$ и радиусом кривизны траектории R формулой

$$a_n = \frac{v_\perp^2}{R}.$$

Отсюда следует:

$$\frac{v_\perp}{R} = \frac{q}{m} B. \quad (1.2)$$

В эту формулу входят 4 величины, три из которых $\left(\frac{q}{m}, B \text{ и } v_{\perp}\right)$ – константы, то есть не зависят ни от времени, ни от координат частицы. Тогда и четвёртая величина (радиус кривизны R) – тоже константа. Единственная кривая, у которой радиус кривизны во всех её точках один и тот же – это окружность. Итак, в плоскости XOZ частица совершает *равномерное вращение по окружности*, а вдоль осей OX и OZ она совершает гармонические колебания. Из формулы (1.2) следуют выражения для радиуса окружности R , угловой скорости частицы ω (циклической частоты) и периода вращения частицы T^2 :

$$R = \frac{v_{\perp}}{\frac{q}{m}B}, \quad (1.3)$$

$$\omega = \frac{v_{\perp}}{R} = \frac{q}{m}B, \quad (1.4)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\frac{q}{m}B}.$$

Скорость $v_{\perp}$ определяется начальными скоростями частицы v_{0x} и v_{0z} :

$$v_{\perp} = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0z}^2}. \quad (1.5)$$

В дальнейшем будем называть скорость $v_{\perp}$ *перпендикулярной скоростью*.

1.4. Траектория частицы

Итак, частица равномерно вращается по окружности в плоскости, перпендикулярной полю, а сама эта плоскость движется равноускоренно вдоль поля. Таким образом, траектория частицы – это винтовая линия. Она показана на рисунке 1.1.

Существуют приборы, позволяющие увидеть траекторию частицы – например, камера Вильсона или пузырьковая камера. Наблюдая траекторию и измеряя её характерные параметры, можно получить информацию о частице. Выясним, какую именно информацию можно получить.

² Период вращения – это время, за которое вращающаяся по окружности частица совершает один полный оборот.

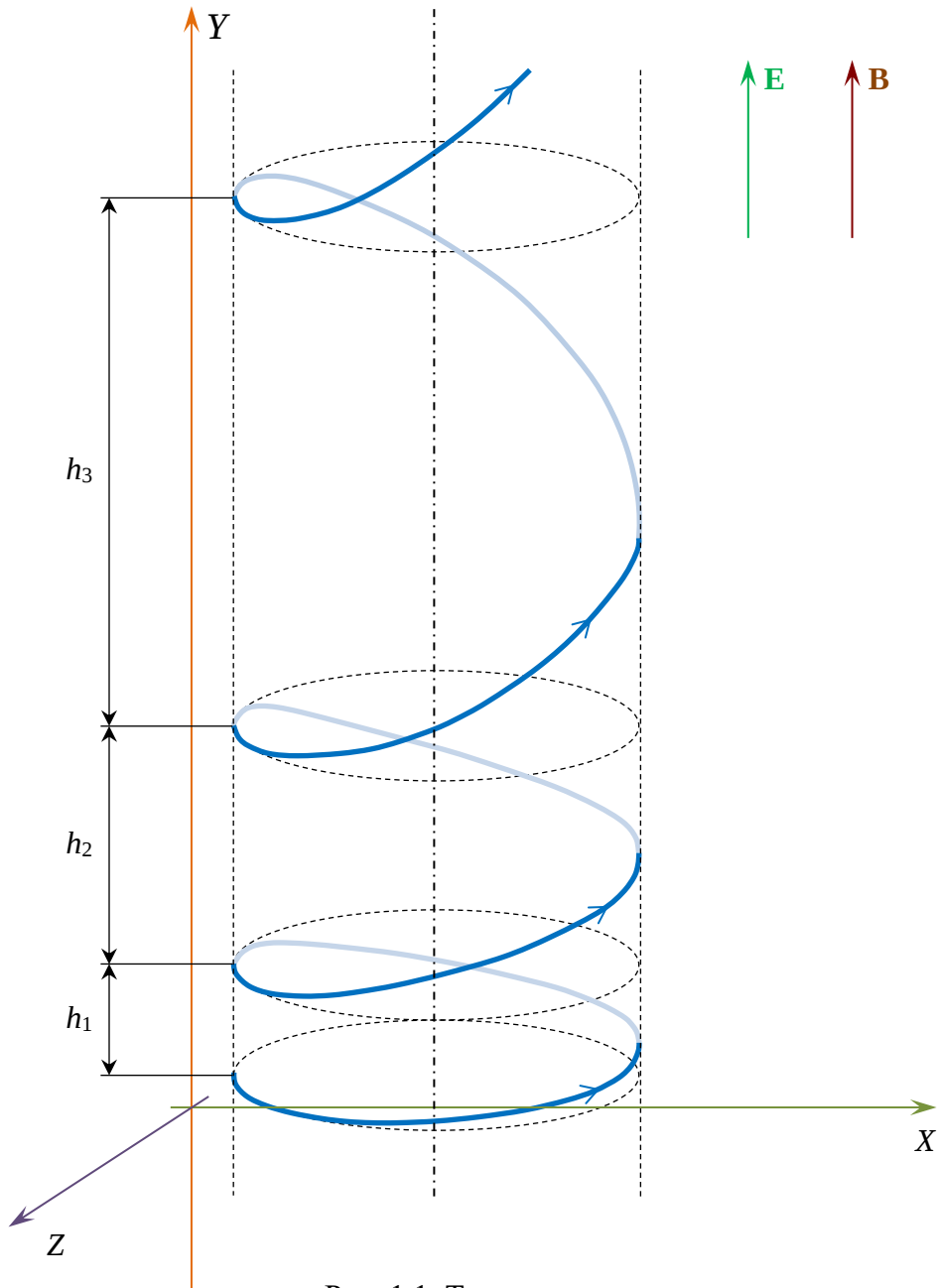


Рис. 1.1. Траектория частицы

У винтовой линии есть два параметра: *радиус* R и *шаг* h . И эти параметры как-то зависят от характеристик полей E и B , и от характеристик частицы: её начальной скорости v_0 , заряда q и массы m . При этом начальная скорость частицы v_0 – это характеристика состояния частицы, которую в ходе экспериментов можно заранее устанавливать и изменять в широком диапазоне, а заряд и масса частицы m – это её постоянные параметры, изменить которые экспериментатор не может, но зато может их измерить.

В данной лабораторной работе вам предлагается исследовать зависимость радиуса траектории частицы R от характеристик полей и частицы. Этот радиус определяется формулой

$$R = \frac{v_{\perp}}{\frac{q}{m}B}. \quad (1.3)$$

Из формулы следует, что радиус траектории частицы пропорционален перпендикулярной скорости $v_{\perp}$, обратно пропорционален магнитной индукции B и не зависит от напряжённости электрического поля E . Данные три факта можно экспериментально проверить и, если эксперименты их подтвердят, то можно измерить удельный заряд частицы $\frac{q}{m}$. Таким образом, для проверки формулы (1.3) надо провести три эксперимента.

Эксперимент 1. Исследование зависимости радиуса траектории частицы R от перпендикулярной скорости $v_{\perp}$. Задача эксперимента: убедиться в прямо пропорциональной зависимости $R(v_{\perp})$. Если эксперимент даст положительный результат, то можно измерить удельный заряд частицы $\frac{q}{m}$. В самом деле, формулу (1.3) можно записать так:

$$R = k_1 v_{\perp}, \quad k_1 = \frac{1}{\frac{q}{m} B},$$

откуда следует, что

$$\frac{q}{m} = \frac{1}{k_1 B}. \quad (1.6)$$

Таким образом, измерив коэффициент пропорциональности k_1 , мы можем измерить и удельный заряд.

Эксперимент 2. Исследование зависимости радиуса траектории частицы R от магнитной индукции B . Задача эксперимента: убедиться в обратно пропорциональной зависимости $R(B)$. Для этого нелинейную теоретическую зависимость $R(B)$ целесообразно сначала линеаризовать, что легко сделать, введя вспомогательную величину

$$u = \frac{1}{B}.$$

От этой величины радиус траектории частицы зависит линейно (прямо пропорционально):

$$R = k_2 u, \quad k_2 = \frac{v_{\perp}}{\frac{q}{m}}.$$

Если эксперимент подтвердит данную прямо пропорциональную зависимость, то это будет подтверждением обратно пропорциональной зависимости $R(B)$. Кроме того, в этом случае можно измерить коэффициент пропорциональности k_2 и опять же – удельный заряд частицы:

$$\frac{q}{m} = \frac{v_{\perp}}{k_2}. \quad (1.7)$$

Эксперимент 3. Из формулы (1.3) следует, что радиус траектории частицы *не зависит* от проекции скорости частицы на направление полей v_y и от напряжённости электрического поля E . Причиной этого является принцип независимости движений. В данном случае он состоит в том, что все проекции скоростей частицы – это независимые функции состояния частицы, каждая из которых зависит только от соответствующей проекции силы, действующей на частицу. Проекция электрической силы $\mathbf{F}_3 = q\mathbf{E}$ на плоскость XOZ , в которой вращается частица, равна нулю, поэтому-то радиус вращения и не зависит от этой силы и от напряжённости E . И тем не менее, интересно убедиться, выполняется ли этот факт на практике. В этом и состоит задача

эксперимента 3: провести измерения радиуса траектории частицы R при различных значениях напряжённости E и выяснить, зависит R от E или нет.

2. Описание экспериментальной установки

Установка позволяет наблюдать траекторию частицы и измерять основные параметры траектории: радиус траектории R и шаг h . При включении установки (при запуске программы) открывается начальное окно с названием работы и кнопками «Ход работы», «Эксперимент», «Завершение работы». Вам надо нажать на кнопку «Эксперимент», и тогда откроется окно, показанное на рисунке 2.1.

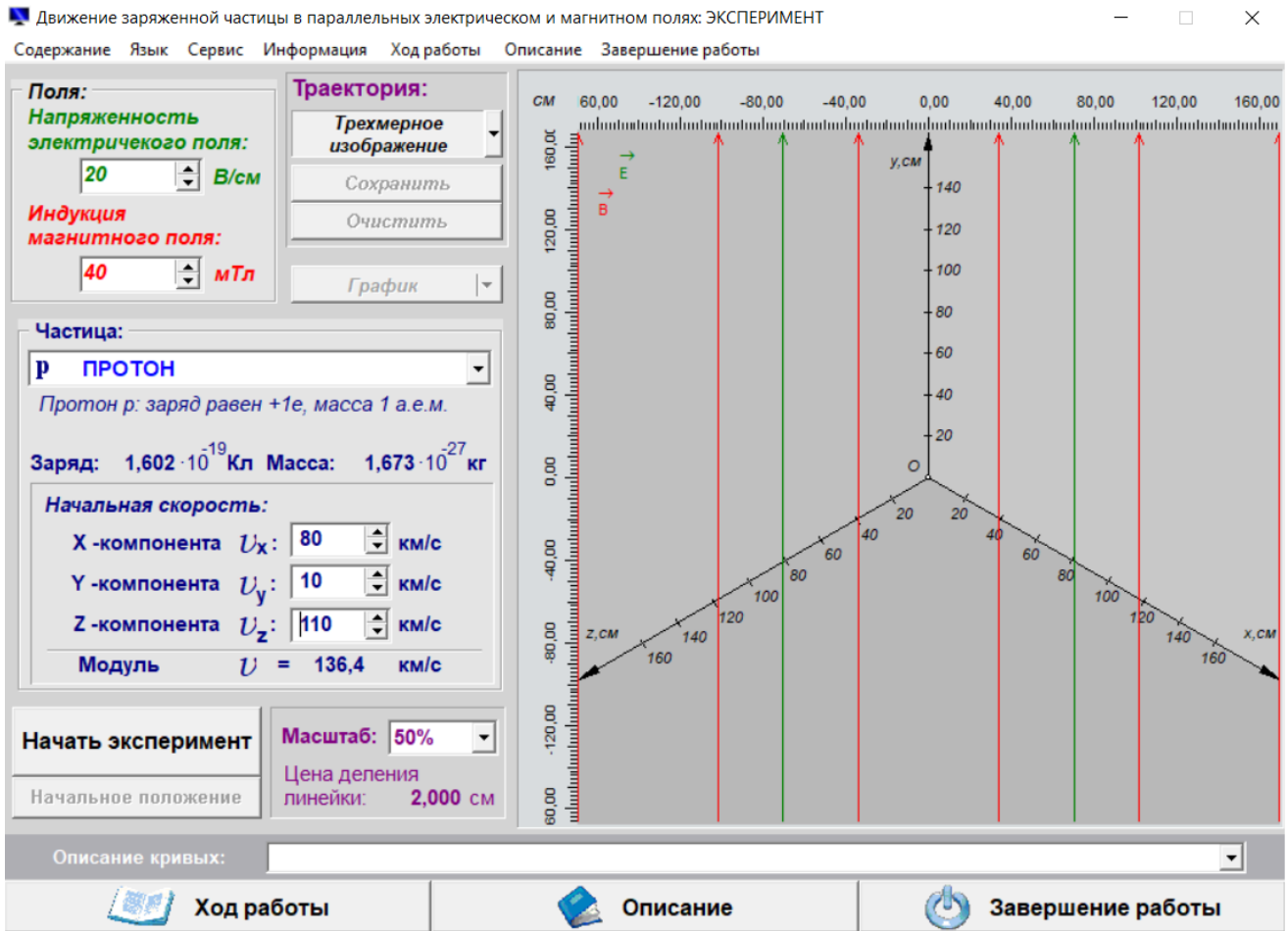


Рис. 2.1. Окно «Эксперимент»

Окно разделено на две области: слева – область управления, справа – область эксперимента.

Область управления содержит:

- раскрывающийся список для выбора частицы,
- окошки для изменения значений напряжённости электрического поля, индукции магнитного поля и проекций начальной скорости частицы v_{0x} , v_{0y} , v_{0z} ,
- кнопки для наблюдения и сохранения траектории,
- кнопки для управления экспериментом.

Область эксперимента и траектория частицы могут быть представлены как в трёхмерном виде, так и виде проекций на плоскости XOY , XOZ и YOZ . Частица начинает свое движение из начала координат, расположенного в центре области экспери-

мента. Во время движения частица оставляет след, что позволяет проводить измерения параметров траектории R и h . Для этого по краям области эксперимента есть две линейки, цена деления которых в зависимости от масштаба изображения может изменяться от 2 см (масштаб 50%) до 0,2 см (масштаб 500%), и бегунки, которые можно перемещать вдоль линеек.

3. Порядок выполнения работы

Эксперимент 1. Исследование зависимости радиуса траектории от перпендикулярной скорости $v_{\perp}$.

3.1. Выберите частицу (по указанию преподавателя) и впишите её название и параметры в таблицу 1.

Таблица 1

Условия эксперимента 1

Частица			
Заряд	q	Кл	
Масса	m	кг	
Удельный заряд (расчётное значение)	q/m	Кл/кг	
Магнитная индукция	B	мТл	
Погрешности прямых измерений	$\Delta(B)$	мТл	
	$\Delta(v_0)$	км/с	

- 3.2. Задайте произвольное значение магнитной индукции B и запишите это значение в таблицу 1.
- 3.3. Выберите в разделе «Траектория» области управления режим «Проекция на плоскость XOZ ».
- 3.4. Выберите в окне «Масштаб» значение 100%.
- 3.5. Задайте значения проекций начальной скорости частицы v_{0x} и v_{0z} примерно 100 км/с.
- 3.6. Значения параллельной составляющей скорости частицы v_{0y} и напряжённости электрического поля E не влияют на радиус траектории частицы, поэтому задайте значения v_{0y} и E равными нулю.
- 3.7. Нажмите кнопку «Начать эксперимент». Частица начнёт двигаться, а кнопка «Начать эксперимент» превратится в кнопку «Остановить эксперимент». Как только частица завершит полный оборот, нажмите кнопку «Остановить эксперимент».
- 3.8. Подберите масштаб так, чтобы траектория частицы была побольше, но при этом помещалась в область эксперимента. Затем, используя бегунок одной из линеек, измерьте координаты крайних точек окружности. Например, если вы будете двигать бегунок горизонтальной линейки, то вам надо измерить две крайние координаты x_{min} и x_{max} . Тогда вы узнаете радиус окружности: $R = \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$. Запишите значения v_{0x} , v_{0z} и результаты измерений в таблицу 2. Туда же занесите погрешность измерения координат, которая зависит от выбранного вами масштаба.
- 3.9. Нажмите кнопку «Очистить», после чего траектория частицы в области эксперимента исчезнет.

3.10. Повторите пункты 3.7 – 3.9 ещё 9 раз, увеличивая каждый раз значения v_{0x} и v_{0z} примерно на 100 км/с.

3.11. Заполните столбец $v_{\perp}$ таблицы 2, используя формулу $v_{\perp} = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0z}^2}$.

Таблица 2

Зависимость радиуса траектории частицы R от скорости частицы $v_{\perp}$

Номер опыта	v_{0x} км/с	v_{0z} км/с	$v_{\perp}$ км/с	$x_{\min}$ см	$x_{\max}$ см	R см	$\Delta(R)$ см
1							
2	0						
...							
...							
10							

3.12. В установке есть кнопка «**Сохранить**», которая позволяет сохранить рисунок области эксперимента вместе с траекторией частицы. Только для этого надо, чтобы масштаб был установлен 100%. Поэтому установите масштаб 100% и проведите ещё раз один из опытов с целью сохранения рисунка. Подберите условия опыта так, чтобы траектория частицы оказалась достаточно большой. При сохранении рисунка вы можете сами выбрать название файла, в который будет помещён рисунок, тип файла и папку. По умолчанию рисунок помещается в папку «Рисунки и графики» на рабочем столе. После сохранения откройте файл с рисунком и скопируйте его в свой отчёт.

3.13. Используя данные, записанные в таблице 2, постройте график зависимости $R(v_{\perp})$. Не забудьте нанести планки погрешностей.

3.14. Вставьте линию тренда вместе с уравнением тренда. Прокомментируйте результат.

3.15. Если график показал прямо пропорциональную зависимость между $v_{\perp}$ и R , то измерьте с помощью функции ЛИНЕЙН угловой коэффициент k_1 зависимости $R(v_{\perp})$ и удельный заряд частицы $\frac{q}{m}$. Для этого воспользуйтесь формулой $\frac{q}{m} = \frac{1}{k_1 B}$ и таблицей 3.

Таблица 3

Измерение удельного заряда частицы

Величина	k_1	q/m
Размерность	см·с/км	Кл/кг
Значение		
Абсолютная погрешность		
Относительная погрешность		

3.16. Напишите в своём отчёте, о чём говорят данные в таблице 3.

Эксперимент 2. Исследование зависимости радиуса траектории от магнитной индукции

3.17. Выберите частицу (по указанию преподавателя) и впишите её название и параметры в таблицу 4.

3.18. Задайте какие-нибудь значения проекций начальной скорости частицы v_{0x} и v_{0z} – желательно не менее 500 км/с. Запишите эти значения в таблицу 4.

3.19. Выберите режим «**Проекция на плоскость XOZ**».

3.20. Выберите масштаб равным 100%.

3.21. Задайте значения v_{0y} и E равными нулю.

Таблица 4

Условия эксперимента 2

Частица			
Заряд	q	Кл	
Масса	m	кг	
Удельный заряд (расчётное значение)	q/m	Кл/кг	
Начальная скорость	v_{0x}	км/с	
	v_{0z}	км/с	
	$v_{\perp}$	км/с	
Погрешности прямых измерений	$\Delta(B)$	мТл	
	$\Delta(v_0)$	км/с	

3.22. Задайте значения магнитной индукции B равным примерно 20 мТл и запишите это значение в таблицу 5.

3.23. Нажмите кнопку «**Начать эксперимент**». Как только частица завершит полный оборот, нажмите кнопку «**Остановить эксперимент**».

3.24. Подберите подходящий масштаб, а затем, используя бегунок одной из линеек, измерьте координаты крайних точек окружности и запишите результаты измерений в таблицу 5.

Таблица 5

Зависимость радиуса траектории частицы R от магнитной индукции B

Номер опыта	B	$u = 1/B$	$x_{\min}$	$x_{\max}$	R	$\Delta(R)$	$\Delta(u)$
	мТл	мТл ⁻¹	см	см	см	см	мТл ⁻¹
1							
2							
...							
...							
10							

3.25. Нажмите кнопку «**Очистить**».

3.26. Повторите пункты 3.23 – 3.25 ещё 9 раз, увеличивая каждый раз значение магнитной индукции. Сначала шаг изменения магнитной индукции сделайте минимальным (5 мТл), затем понемногу увеличивайте его до (40 – 50) мТл.

3.27. Заполните до конца таблицу 5.

3.28. Используя данные, записанные в таблице 5, постройте график зависимости $R(u)$. Не забудьте нанести планки погрешностей.

3.29. Вставьте линию тренда вместе с уравнением тренда. Прокомментируйте результат.

3.30. Если график покажет прямо пропорциональную зависимость между радиусом траектории частицы R и вспомогательной величиной u , то измерьте с помощью функции ЛИНЕЙН угловой коэффициент k_2 зависимости $R(u)$ и удельный заряд частицы $\frac{q}{m}$. Для этого воспользуйтесь формулой $\frac{q}{m} = \frac{v_{\perp}}{k_2}$ и таблицей 6.

Таблица 6

Измерение удельного заряда частицы

Величина	k_2	q/m
Размерность	см·мТл	Кл/кг
Значение		
Абсолютная погрешность		
Относительная погрешность		

3.31. Напишите в своём отчёте, о чём говорят данные в таблице 6.

Эксперимент 3. Исследование зависимости радиуса траектории частицы от напряжённости электрического поля

3.32. Выберите частицу (по указанию преподавателя) и впишите её название и параметры в таблицу 7.

3.33. Задайте какие-нибудь значения проекций начальной скорости частицы v_{0x} и v_{0z} (не менее 100 км/с) и магнитной индукции B (не менее 40 мТл). Запишите эти значения в таблицу 7.

Таблица 7

Условия эксперимента 3

Частица			
Заряд	q	Кл	
Масса	m	кг	
Начальная скорость	v_{0x}	км/с	
	v_{0z}	км/с	
Магнитная индукция	B	мТл	
Погрешность измерения напряжённости электрического поля	$\Delta(E)$	В/см	

3.34. Выберите «**Проекция на плоскость XOZ**».

3.35. Выберите масштаб равным 100%.

3.36. Задайте значение напряжённости электрического поля E равным –200 В/см и запишите это значение в таблицу 8.

3.37. Нажмите кнопку «**Начать эксперимент**». Как только частица завершит полный оборот, нажмите кнопку «**Остановить эксперимент**».

3.38. Подберите подходящий масштаб, а затем измерьте координаты крайних точек окружности и запишите результаты измерений в таблицу 8.

Таблица 8

Зависимость радиуса траектории частицы R от напряжённости электрического поля E

Номер опыта	E	$x_{\min}$	$x_{\max}$	$\Delta(x)$	R
	В/см	см	см	см	см
1					
2					
...					
...					
10					

3.39. Нажмите кнопку «Очистить».

3.40. Повторите пункты 3.36 – 3.38 ещё несколько раз, увеличивая каждый раз значение напряжённости электрического поля примерно на 40 – 50 В/см.

3.41. Прокомментируйте результат.

3.42. Сформулируйте общие выводы по лабораторной работе.

4. Оценка погрешностей измерений

4.1. Погрешность измерения радиуса траектории частицы.

Для измерения радиуса траектории используется формула

$$R = \frac{x_{max} - x_{min}}{2},$$

из которой следует:

$$\Delta(R) = \frac{1}{2}(\Delta(x_{max}) + \Delta(x_{min})) = \Delta(x).$$

4.2. Погрешность измерения скорости частицы $v_{\perp}$.

Эта скорость определяется по формуле

$$v_{\perp} = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0z}^2}.$$

Используем общее правило

$$\Delta(v_{\perp}) = \sqrt{[\Delta_1(v_{\perp})]^2 + [\Delta_2(v_{\perp})]^2},$$

где $\Delta_1(v_{\perp})$ и $\Delta_2(v_{\perp})$ – частные погрешности. Оценим первую из них.

$$\Delta_1(v_{\perp}) = \left| \frac{\partial v_{\perp}}{\partial v_{0x}} \right| \Delta(v_{0x}) = \frac{1}{2\sqrt{v_{0x}^2 + v_{0z}^2}} 2v_{0x} \Delta(v_0) = v_{0x} \frac{\Delta(v_0)}{v_{\perp}}.$$

Формула для второй частной погрешности аналогична, поэтому

$$\Delta(v_{\perp}) = \frac{\Delta(v_0)}{v_{\perp}} \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0z}^2} = \Delta(v_0).$$

4.3. Погрешность измерения вспомогательной величины $u = \frac{1}{B}$.

$$\varepsilon(u) = \varepsilon(B), \quad \Delta(u) = u\varepsilon(u).$$

4.4. Погрешность измерения удельного заряда при выполнении эксперимента 1.

Для измерения используется формула $\frac{q}{m} = \frac{1}{k_1 B}$. Из этой формулы следует:

$$\varepsilon\left(\frac{q}{m}\right) = \varepsilon(k_1) + \varepsilon(B).$$

4.5. Погрешность измерения удельного заряда при выполнении эксперимента 2.

Для измерения используется формула $\frac{q}{m} = \frac{v_{\perp}}{k_2}$. Из этой формулы следует:

$$\varepsilon\left(\frac{q}{m}\right) = \varepsilon(v_{\perp}) + \varepsilon(k_2).$$

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Какие поля называются однородными?
- 5.2. Какие поля называются стационарными?
- 5.3. Какие поля называются параллельными?
- 5.4. Как движется заряженная частица в направлении поля?
- 5.5. Как движется заряженная частица в плоскости, перпендикулярной полю?
- 5.6. Как называется кривая, которая является траекторией заряженной частицы в параллельных однородных и стационарных электрическом и магнитном полях?
- 5.7. Можно ли увидеть и сфотографировать траекторию заряженной частицы?
- 5.8. Как зависит радиус траектории частицы от начальной скорости частицы?
- 5.9. Как зависит радиус траектории частицы от магнитной индукции?
- 5.10. Почему радиус траектории частицы не зависит от напряжённости электрического поля?
- 5.11. Зачем в экспериментальной установке кнопка «Масштаб»?

6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 6.1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. – М.: Наука, 1977–1985г.
- 6.2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. – М.: Наука, 1989.
- 6.3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2003.
- 6.4. Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. Лабораторный практикум по изучению моделей физических процессов на компьютере. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007.
- 6.5. Рипп А.Г. Обработка измерений: метод. пособие. – Севастополь: СНУЯЭП, 2012.

**Рипп Александр Гешелевич
Довгалаенко Владимир Васильевич**

**Радиус вращения частиц
в параллельных полях**

Учебное пособие по общей физике

В авторской редакции

Изд. № 28/18. Объём: 1 п. л.

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»