

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КАЗАНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ
для студентов специальностей 2903, 2906, 2907, 2908, 2910

Лабораторная работа № 73
ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В
ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Казань - 2010 г.

Составитель: Алексеев В.В.
Под редакцией Л. И. Маклакова

УДК 539.425

Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов специальностей 2903, 2906, 2907, 2908, 2910.

Лабораторная работа № 73. "Изучение движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях"/ Казанская государственная архитектурно-строительная академия. Составитель Алексеев В.В. (под редакцией Л. И. Маклакова). Казань, 2010 г.

В работе рассмотрены вопросы, связанные с движением заряженных частиц в электрических и магнитных полях. С помощью ЭВМ имитируется работа масс-спектрометра. Проводится измерение удельных зарядов различных ионов.

Стр.8, рис.5, табл. 1

Рецензент: доцент кафедры молекулярной физики Казанского госуниверситета Г. Г. Пименов

© Казанская государственная архитектурно- строительная академия, 2010 г.

Широкое распространение в науке, технике и быту получили электронные лампы, электронно-лучевые трубки, применяемые в телевизорах, осциллографах, радиолокаторах и других устройствах, электронные микроскопы, ускорители заряженных частиц, масс-спектрометры и многое другое. Принцип действия этих электронных приборов основан на взаимодействии заряженных частиц с электрическими и магнитными полями, в которых они движутся.

Целью данной работы является изучение движения ионов в однородном магнитном поле и определение их удельного заряда и массы.

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

На электрический заряд q , находящийся в электрическом поле напряжённости \dot{E} , действует сила

$$\dot{F}_{\text{эл}} = q\dot{E}. \quad (1)$$

Направление этой силы совпадает с вектором \dot{E} для положительных зарядов и противоположно для отрицательных зарядов. На заряд, движущийся со скоростью \dot{u} в магнитном поле с индукцией \dot{B} , оказывает действие сила \dot{F}_L , называемая *силой Лоренца*. Её модуль находится по формуле:

$$F_L = qBu \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

где α — угол между векторами \dot{u} и \dot{B} . Направление этой силы находится по правилу *левой руки*: если руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, вытянутые четыре пальца совпадали с направлением скорости положительно заряженной частицы, то отогнутый на 90° большой палец даёт направление силы. В случае отрицательно заряженной частицы направление силы будет противоположным. Таким образом, сила \dot{F}_L перпендикулярна к плоскости, проведённой через векторы \dot{u} и \dot{B} , следовательно, перпендикулярна и к самим векторам. Взаимная ориентация векторов \dot{u} , \dot{B} и \dot{F}_L показана на рис. 1. Из выражения (2) следует, что магнитное поле не действует на заряженную частицу, когда она неподвижна ($u = 0$) и когда частица движется вдоль линии индукции магнитного поля ($\alpha = 0$ или $\alpha = \pi$, тогда $\sin \alpha = 0$). Формулу (2) можно записать в векторном виде, воспользовавшись векторным произведением векторов:

$$\dot{\vec{F}}_L = q[\dot{\vec{u}}\dot{\vec{B}}]. \quad (3)$$

Очевидно, что сила $\dot{\vec{F}}$, действующая на заряд, движущийся в электрическом и магнитном полях, равна

$$\dot{\vec{F}} = q(\dot{\vec{E}} + [\dot{\vec{u}}\dot{\vec{B}}]). \quad (4)$$

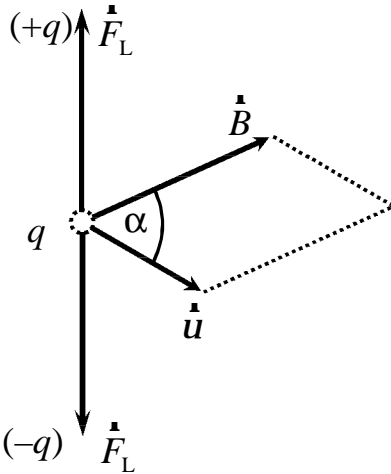


Рис. 1

Выражение (4) называют *обобщённой силой Лоренца*. Как следует из (4), обобщённая сила Лоренца зависит от взаимной ориентации и модулей векторов $\dot{\vec{E}}$, $\dot{\vec{u}}$ и $\dot{\vec{B}}$. Вследствие этого траектория частицы может быть сложной кривой. Рассмотрим движение заряженной частицы в однородном магнитном поле ($\dot{\vec{B}} = \text{const}$). Пусть положительно заряженная частица массой m и зарядом q влетает в такое поле со скоростью $\dot{\vec{u}}$, направленной перпендикулярно к вектору $\dot{\vec{B}}$ индукции магнитного

поля, т.е. $\alpha = 90^\circ$ (рис. 2). В этом случае на частицу действует только сила Лоренца $\dot{\vec{F}}_L$, которая сообщает ей нормальное ускорение $\dot{\vec{a}}_n$, так как сила перпендикулярна к скорости. Согласно второму закону Ньютона, учитывая (3), запишем: $\dot{\vec{a}}_n = \frac{\dot{\vec{F}}_L}{m} = \frac{q}{m}[\dot{\vec{u}}\dot{\vec{B}}]$ или в скалярном виде

$$a_n = \frac{q}{m} u B, \quad (5)$$

поскольку $\alpha = 90^\circ$ и $\sin 90^\circ = 1$.

Выясним форму траектории для данного случая. Вследствие того, что направление вектора $\dot{\vec{B}}$ не меняется, то векторы $\dot{\vec{u}}$ и $\dot{\vec{F}}_L$ лежат в одной плоскости, перпендикулярной к $\dot{\vec{B}}$. Модуль нормального ускорения находится по формуле: $a = u^2/R$, где R — радиус кривизны траектории частицы в различных её точках. Подставляя это выражение в (5), получаем:

$$R = \frac{m u}{q B}. \quad (6)$$

Так как сила $\dot{\vec{F}}_L$ перпендикулярна к $\dot{\vec{u}}$, то модуль скорости остаётся постоянным, а изменяется только её направление. К тому же модуль вектора $\dot{\vec{B}}$ также постоянен. Поэтому из (6) следует, что радиус кривизны является постоянной величиной ($R = \text{const}$), поскольку все величины постоянные. Следовательно, траектория частицы — окружность (см. рис. 2). (Окружность — это геометрическое место точек на плос-

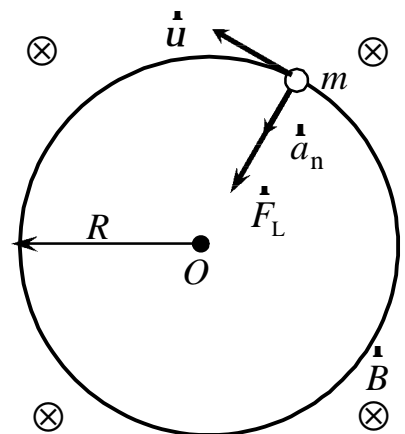


Рис. 2

кости, одинаково удалённых от одной точки, называемой центром окружности).

Из уравнения (5) можно сделать вывод, что характер движения заряженной частицы зависит не от её заряда q или m массы в отдельности, а от отношения q/m . Отношение заряда частицы к её массе называют *удельным зарядом*.

МАСС-СПЕКТРОСКОПИЯ

Масс-спектрокопия — это метод исследования по спектру масс атомов и молекул, входящих в его состав. Сущность метода состоит в том, что ионизированные атомы и молекулы вещества разделяются по величине удельного заряда и отдельно регистрируются с помощью масс-спектрометра. Из полученного масс-спектра определяются величины масс и относительное содержание компонентов в исследуемом веществе. Масс-спектрокопия является универсальным аналитическим методом, широко применяющимся в экспериментальной физике, химии, геологии и технике.

Масс-спектрометр — прибор, разделяющий с помощью электрических и магнитных полей пучки заряженных частиц с различными удельными зарядами. Он состоит из следующих основных частей: ионного источника, анализатора и приёмного устройства. В масс-спектрометр включаются также система манометров для измерения давления и вакуумный насос, обеспечивающий высокий вакуум в анализаторе и ионном источнике.

Рассмотрим принцип действия масс-спектрометра. В камере K ионного источника (рис. 3) осуществляется ионизация исследуемого вещества. Если вещество находится в жидком или твёрдом состоянии, то его сначала превращают в пар. Затем ионы формируются в слабо расходящийся пучок. При этом они ускоряются в электрическом поле до определённой скорости, определяемой напряжением U между камерой и анодом $Ан$. Действительно, работа A , совершаемая электрическим полем при перемещении иона между указанными электродами, равна:

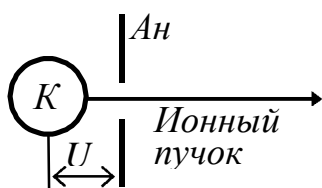
$$A = qU, \quad (7)$$

где q — заряд иона. За счёт этой работы происходит увеличение кинетической энергии иона от начального значения W_{k1} , которую можно считать равной нулю, до конечного значения W_{k2} . Согласно теореме о кинетической энергии, запишем:

$$A = W_{k2} - W_{k1} = W_{k2}. \quad (8)$$

Рис. 3 Обозначим конечную скорость иона через u . Тогда $W_{k2} = mu^2/2$, где m — масса иона. С учётом этого из (7) и (8) следует, что $mu^2/2 = qU$. Отсюда

$$u = \sqrt{2qU/m}. \quad (9)$$



Анализатор представляет собой ионнооптическую систему (комбинацию электрических и магнитных полей), обладающую свойством собирать вместе ионы с определённым значением удельного заряда, движущихся с одинаковыми скоростями, независимо от направления их вылета из источника. На рис. 4 приведена схема анализатора, когда источник ионов S и выходная щель S' находятся за пределами однородного магнитного поля, созданного в ограниченной области в виде сектора. Ионы, изменив под действием магнитного поля направление движения, собираются на щели S' . Однородное секторное поле практически получают в узком зазоре между полюсами магнита, если они имеют призматическую форму.

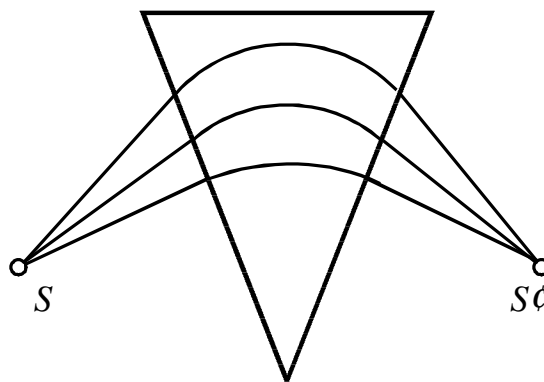


Рис. 4

Приёмное устройство состоит из коллектора ионов, представляющего собой набор специальных электродов, соединённого с усилителем ионного тока и регистрирующим прибором. Пики ионных токов записываются на ленте электронного потенциометра (самописца) при плавной развёртке по удельным зарядам за счёт плавного изменения магнитного поля анализатора, вызванного изменением силы тока, текущего по обмотке электромагнита.

В данной работе имитируется действие масс-спектрометра с видимой траекторией ионных пучков. На экране дисплея изображены область секторного маг-

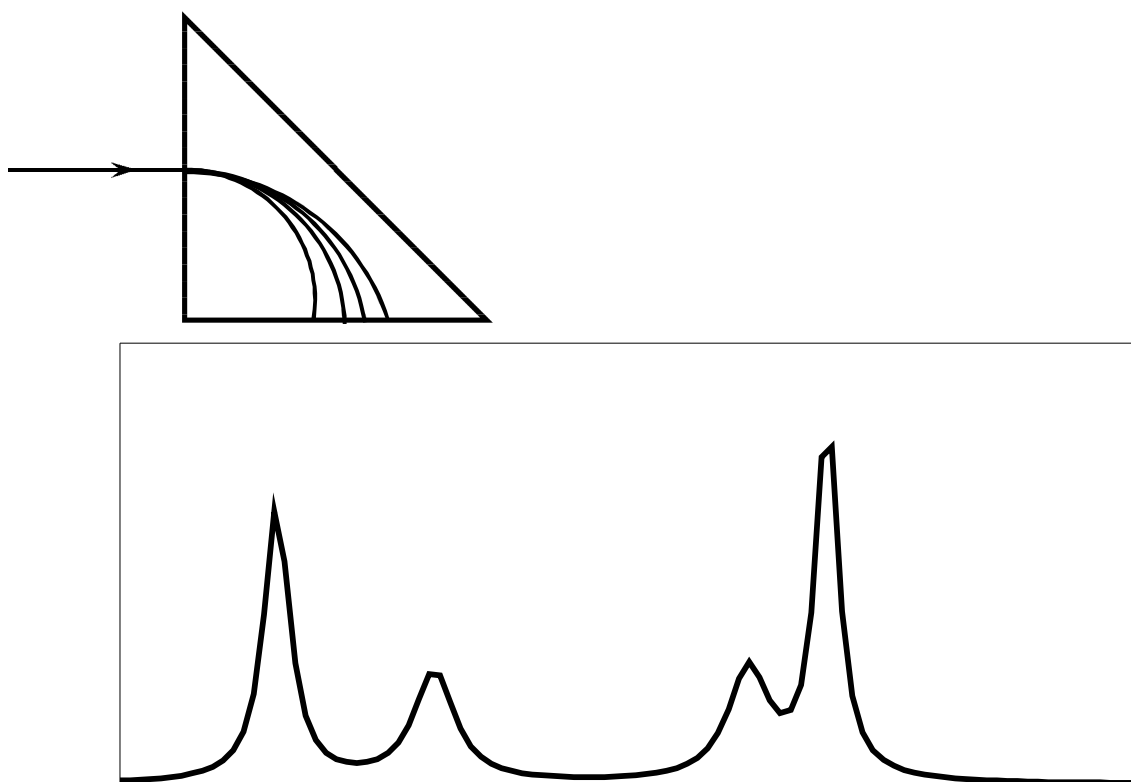


Рис. 5

нитного поля, источник (слева) и коллектор ионов (справа) (рис. 5), а также назначение управляющих клавиш, с помощью которых устанавливаются значения ускоряющего напряжения U и индукция магнитного поля B . На отдельном поле экрана по точкам формируется масс-спектрограмма, максимумам которой соответствует точное попадание ионного пучка в коллектор ионов.

Подставляя выражение (9) в (6), находим удельный заряд иона:

$$\frac{q}{m} = \frac{2U}{R^2 B^2}, \quad (10)$$

где R — радиус окружности, при движении по которой ионы с данным значением удельного заряда попадают в коллектор ионов.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включите компьютер, нажав на соответствующую клавишу на передней панели источника питания.
2. После загрузки компьютера и появления заставки “НОРТОНА КОМАНДЕРА” НАЖМИТЕ КЛАВИШУ “ F2 “.
3. Передвигая курсор клавишей “↓”, выберите работу №73.
4. Узнайте номер Вашего варианта у преподавателя.
5. Установите курсор с помощью клавиатуры (клавишами “←”, “↑”, “→”, “↓”) на номер Вашего варианта. Нажмите на левую клавишу “SHIFT”. При этом происходит выделение цифры жёлтым цветом.
6. Установите курсор с помощью клавиатуры (клавишами “←”, “↑”, “→”, “↓”) на “START”. Нажмите на левую клавишу “SHIFT”. При этом на экране появляется спектр исследуемого вещества.
7. Поочерёдно установите вертикальную линию на максимумы спектральных линий, записывая значения индукции B магнитного поля. Это осуществляется с помощью клавиатуры (клавишами “←”, “→”).
8. По формуле (10), подставляя значение $U = 100$ В и соответствующие значения B , вычислите q/m . Радиус $R = 0,4$ м.
9. Приняв заряд иона равным $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, т.е. считая ион однократно ионизированным, вычислите массу m ионов.
10. Выразите массу ионов в атомных единицах массы (а.е.м.), учитывая что $1 \text{ а.е.м.} = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Данные занесите в таблицу.

№	1	2	3	4
$B, \text{ Тл}$				
$q/m, \text{ Кл / кг}$				
$A, \text{ а.е.м.}$				

11. Для отключения компьютера нажмите правую клавишу “SHIFT” клавиатуры. Затем одновременно нажмите клавиши “ALT” и “X”, а затем “ENTER”. После этого отключите компьютер, нажав соответствующую клавишу на передней панели источника питания.

Примечание. В случае необходимости для повторения измерения нажмите правую клавишу “SHIFT” на клавиатуре.