

гией ~ 1 МэВ оценка дает $\lambda \sim 10^{20}$ см, что в 10^{11} раз превышает размеры земного шара. Это показывает, что столкновения с другими частицами не препятствуют частице громадное число раз претерпеть отражения вблизи магнитных полюсов, прежде чем она попадет в конус потерь и покинет земное магнитное поле.

§ 89. Определение удельного заряда частицы

1. *Удельным зарядом частицы* называется отношение заряда e этой частицы к ее массе m . При определении этого отношения заряд e принято выражать в единицах СГСМ, а массу m — в граммах. В соответствии с этим в настоящем параграфе применяется система СГСМ. Удельный заряд можно определить, исследуя движение частицы в поперечных электрическом и магнитном полях. Такие исследования производились Дж. Дж. Томсоном и его сотрудниками в конце прошлого и начале настоящего столетия с целью установления природы катодных и анодных лучей в трубках

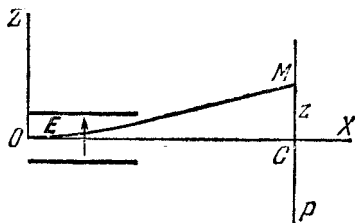


Рис. 225.

с разреженными газами (давление порядка нескольких сотых мм рт. ст.). Они привели к открытию *электрона* и *изотопов*, т. е. химических элементов, ядра которых имеют одинаковые заряды, но различные массы.

2. Исследуем сначала движение частицы в поперечном электрическом поле заряженного конденсатора. Направим ось X параллельно пластинам конденсатора, а ось Z — перпендикулярно. Пусть частица перед входом в конденсатор двигалась вдоль оси X (рис. 225). В дальнейшем под действием электрического поля конденсатора она отклонится в направлении оси Z и будет двигаться в плоскости ZX . Уравнения движения частицы имеют вид

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = eE_x, \quad m \frac{d^2z}{dt^2} = eE_z. \quad (89.1)$$

Будем предполагать, что угол наклона траектории частицы к оси X на протяжении всего движения мал и, следовательно, $v_z \ll v_x$. В этом случае величиной v_z^2 можно пренебречь по сравнению с v_x^2 и написать $v_x = (v^2 - v_z^2)^{1/2} \approx v [1 - 1/2 (v_z/v)^2] \approx v$, где v — полная скорость частицы. В том же приближении скорость v можно считать постоянной, а движение параллельно оси X — равномерным. Исключив время t с помощью соотношения $dx = v dt$, получим уравнение траектории в дифференциальной форме:

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{e}{mv^2} E_z. \quad (89.2)$$

В конденсаторе электрическое поле однородно и равно E , за исключением малой области вблизи его краев, где E_z меняется от E до 0. Выйдя из конденсатора, частица движется свободно, т. е. прямолинейно и равномерно, и попадает на фотопластинку P в точке M , отклонившись от оси X на расстояние $z = CM$. Отклонение z найдется двукратным интегрированием уравнения (89.2) и равно

$$z = A \frac{e}{mv^2}, \quad (89.3)$$

где A — постоянная прибора:

$$A = \int_0^L dx \int_0^x E_z(x') dx',$$

а через L обозначено расстояние OC от начала координат O до фотопластинки. Введя обозначение $f(x) = \int_0^x E_z(x') dx'$, можем написать

$A = \int_0^L f(x) dx$. После этого, выполнив интегрирование по частям, получим

$$A = \int_0^L (L-x) E_x dx. \quad (89.4)$$

Если пренебречь неоднородностью поля на краях конденсатора, то интегрирование легко выполняется и приводит к результату

$$A = El \left(L - \frac{l}{2} \right),$$

где l — длина конденсатора.

3. Рассмотрим теперь движение заряженной частицы поперек магнитного поля в аналогичных условиях. Поле предполагается однородным и направленным параллельно оси Y (рис. 226). Исключение составляют только края области, занимаемой магнитным полем, где существуют отступления от однородности. Однако, как и в случае электрического поля, влияние неоднородностей магнитного поля предполагается малым. Пусть частица перед входом в магнитное поле по-прежнему двигалась в направлении оси X , а в дальнейшем отклонялась от этого направления мало. Тогда при вычислении силы Лоренца $F = e[\mathbf{v}\mathbf{B}]$ скорость \mathbf{v} можно считать направленной всюду параллельно оси X , т. е. вдоль единичного вектора i : $\mathbf{v} = v\mathbf{i}$. В этом

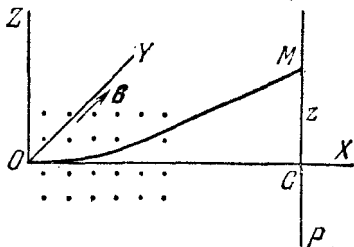


Рис. 226.

приближении $F = ev [iB] = ev ([ij] B_y + [ik] B_z) = ev (B_y k - B_z j)$. Так как основное поле параллельно оси Y , то составляющей B_z можно пренебречь. Тогда частица будет отклоняться в направлении оси Z в соответствии с уравнением

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = evB_y.$$

Это уравнение может быть получено из второго уравнения (89.1), если в нем E_z заменить на vB_y . Поэтому, не производя дальнейших вычислений, можно написать сразу

$$z = C \frac{e}{mv}, \quad (89.5)$$

где C — постоянная прибора:

$$C = \int_0^L (L - x) B_y dx. \quad (89.6)$$

4. Таким образом, отклонения в поперечном электрическом поле пропорциональны $e/(mv^2)$, а в поперечном магнитном поле — $e/(mv)$. Поэтому, измерив эти отклонения, можно вычислить не только удельный заряд e/m , но и скорость частицы v . Практически удобно конденсатор поместить в магнитное поле, чтобы частица подвергалась одновременному действию электрического и магнитного полей. Сами поля E и B могут быть либо параллельными, либо перпендикулярными друг к другу. В ранних исследованиях опыты производились с катодными лучами (электронами) и с анодными лучами (ионами).

Если электрическое поле конденсатора E перпендикулярно к магнитному полю B , то эти поля будут отклонять частицу в одном и том же или в прямо противоположных направлениях (на рис. 225 и 226 в направлении оси Z). Удобно напряжение на конденсаторе подобрать таким, чтобы для частиц с определенной скоростью эти отклонения компенсировали друг друга, т. е. чтобы частица проходила через прибор без отклонения. Затем надо выключить одно из полей и измерить получающееся отклонение. Тогда

$$z = A \frac{e}{mv^2} = -C \frac{e}{mv}.$$

Измерив z , отсюда легко вычислить скорость v и удельный заряд e/m . Таким путем Дж. Дж. Томсон в 1897 г. впервые измерил e/m для катодных лучей.

Одна из трудностей в этих исследованиях состояла в том, что частицы в электронных и ионных пучках обладали большим разбросом скоростей. Для исключения влияния этого разброса электрическое и магнитное поля выбирались параллельными друг другу. Допустим, что они направлены вдоль оси Z . Тогда электрическое поле будет отклонять частицу в направлении оси Z , а магнитное —

в направлении оси Y . Для этих отклонений можно написать

$$z = A \frac{e}{mv^2}, \quad y = C \frac{e}{mv}.$$

Эти соотношения дают в параметрической форме уравнение кривой на фотопластинке, на которую попадают частицы с одинаковым удельным зарядом e/m , но с различными скоростями v . Параметром служит скорость v . Исключив этот параметр, представим уравнение той же кривой в виде

$$z = \frac{A}{C^2} \frac{m}{e} y^2.$$

Это — парабола. Измеряя отношение z/y^2 , можно вычислить удельный заряд e/m . Этим «методом парабол» Дж. Дж. Томсон в 1912 г. открыл изотопы нерадиоактивных элементов (неон).

Развитие вакуумной техники и разработка источников электронов и ионов позволили производить подобные измерения в более определенных и лучше контролируемых условиях. Например, для получения пучка электронов с определенной скоростью v можно использовать явление *термоэлектронной эмиссии*. Источником электронов служит раскаленная вольфрамовая нить. Электроны, испущенные этой нитью, ускоряются до определенной энергии приложенным напряжением и одновременно коллимируются с помощью отверстий или щелей, а затем подвергаются отклонению в электрических и магнитных полях.

В нашу задачу не входит изложение современных методов измерения удельных зарядов. Этим занимается *масс-спектрометрия* и *масс-спектрография*. Укажем только на основной результат, установленный еще в конце прошлого столетия. Оказалось, что в случае анодных лучей удельный заряд e/m зависит от состава газа в трубке и составляет $\sim 10^4$ СГСМ-ед. заряда/г или меньше. Для катодных лучей эта величина много больше, а именно $e/m = = 1,759 \cdot 10^7$ СГСМ-ед. заряда/г, и не зависит от состава газа в трубке. Установление этого факта Дж. Дж. Томсоном в 1897 г. означало открытие электрона.

ЗАДАЧА

В одном из ранних методов определения удельного заряда электрона электроны, вырванные из алюминиевого диска K , ускорялись разностью потенциалов V , приложенной между K и щелью S (рис. 227). Пройдя через щель S , электронный пучок попадал в однородное магнитное поле, перпендикулярное к плоскости рисунка. Вся система помещалась в вакууме. Изменяя напряженность магнитного поля, добивались того, чтобы ток на коллекторе C , регистрируе-

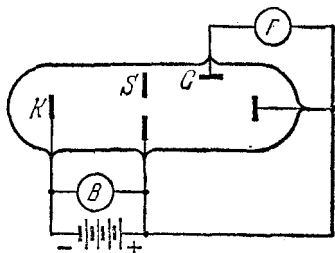


Рис. 227.

мый гальванометром G , был максимален. Измерив магнитное поле B в этот момент, можно вычислить e/m . Провести этот расчет, если расстояние между щелью S и коллектором C равно $d = 10$ см, угол между прямой, проведенной от S к C , и начальным направлением электронного пучка $\alpha = 30^\circ$, $V = 1000$ В, $B = 10,6$ Гс.

$$\text{Ответ. } \frac{e}{m} = \frac{8V}{B^2 d^2} \sin^2 \alpha = 1,78 \cdot 10^7 \text{ СГСМ-ед. заряда/г.}$$

§ 90. Измерение элементарного заряда методом масляных капель

1. Опыты по измерению удельного заряда e/m укрепили представление об атомистической природе электричества. Дж. Дж. Томсон и его ученики Таунсенд (1868—1957) и Чарльз Вильсон (1869—1959) произвели первые измерения и самого *элементарного заряда*, т. е. наименьшего электрического заряда, встречающегося в природе.

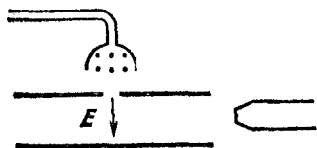


Рис. 228.

Однако их методами нельзя было получить точные результаты. Точные измерения были выполнены Робертом Милликеном (1868—1953) в классических опытах в 1908—1916 гг. Эти опыты принесли также неопровержимое доказательство *атомизма электричества*. Милликен измерял электрический заряд малых капелек масла. Схема его установки показана на рис. 228. В тщательно изготовленный плоский конденсатор через отверстие в верхней пластине могут попадать мелкие капельки масла, получаемые с помощью специального распылителя. С целью предохранения капелек от конвекционных потоков воздуха конденсатор заключен в защитный кожух, температура и давление воздуха в котором поддерживаются постоянными. На пластины конденсатора можно было накладывать постоянное напряжение от источника в несколько тысяч вольт. В ходе опыта это напряжение можно было менять. При распылении капельки масла заряжаются, и, попадая в конденсатор, движутся под действием собственного веса и приложенного электрического поля. Движение отдельной капельки можно наблюдать с помощью микроскопа через специальное окошко.

Аналогичной установкой пользовался А. Ф. Иоффе (1880—1960) в 1912 г. В его опытах вместо капелек масла применялись цинковые пылинки, а также капельки ртути.

2. Допустим сначала, что электрического напряжения на конденсаторе нет. Тогда капля, попавшая в конденсатор, будет падать вниз под действием собственного веса, встречая при этом падении силу сопротивления kv , пропорциональную скорости капли v . Установившаяся скорость падения v_g в поле тяжести определится