

ЧАСТЬ ШЕСТАЯ

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

ГЛАВА XII

СТРОЕНИЕ ЯДЕР, РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД ЯДЕР И ИХ ИСКУССТВЕННОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ

§ 85. Заряд и масса ядра. Масс-спектральный анализ

Развитие ядерной физики началось с исследования явлений радиоактивности и точных измерений масс атомов методом масс-спектрального анализа. Этот метод (разработанный в первые два десятилетия нашего века Дж. Дж. Томсоном и Астоном и в последующие годы доведенный до высокого совершенства) позволяет с большой точностью определять отношение массы частицы к ее заряду $\frac{m}{e}$.

Поскольку к 20-м годам нашего века стали точно известны заряды ядер Ze , то по значениям этого отношения оказалось возможным с высокой точностью определять массы ядер, а на основе закона пропорциональности массы и энергии вычислять и их энергии, что позволило предсказывать, какие превращения атомных ядер энергетически наиболее вероятны.

Для пояснения метода Томсона — Астона представим себе, что тонкий пучок положительно заряженных ионов (каналовых лучей, т. II, § 46; в предыдущих изданиях § 53) падает на вертикальный флуоресцирующий экран или на фотографическую пластинку перпендикулярно к ее поверхности. Если на этот пучок воздействовать электрическим полем, силовые линии которого лежат в горизонтальной плоскости и направлены, как показано на рис. 339, перпендикулярно к плоскости чертежа к читателю, то траектории всех ионов, имеющих одинаковую скорость v и одинаковый «удельный заряд» $\frac{e}{m}$, окажутся отклоненными в этом же направлении на некоторый угол, тем больший, чем меньше скорость ионов. Поскольку скорости ионов, образующих пучок, различны, то он приобретает форму полувеера, расположенного в горизонтальной плоскости и раскрытого к читателю. Если одновременно воздействовать на движущиеся ионы магнитным полем так, чтобы оно отклонило ионы по вертикали

кверху (для этого линии магнитного поля должны быть направлены тоже горизонтально), то полувеер приобретает выгнутую кверху форму; при этом крайняя часть полувеера, где движутся ионы с наименьшей скоростью, получит наибольшее отклонение.

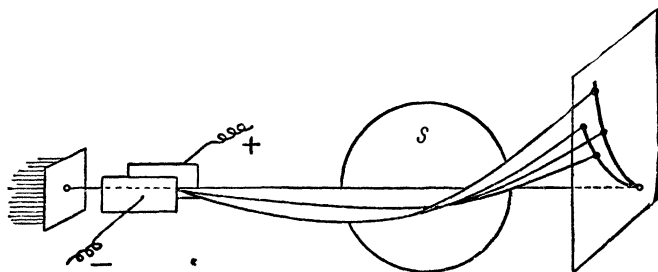


Рис. 339. Схема масс-спектрографа Томсона.

Допустим, что поток частиц состоит из одновалентных ионов двух сортов с массами m_1 и m_2 , причем ионы каждого сорта могут иметь скорости, заключенные в пределах от нуля до некоторого значения v ; любой луч полувеера в электрическом поле будет содержать оба сорта ионов. В магнитном поле каждый такой луч разделится на два луча, расположенных в вертикальной плоскости, причем луч, сильнее отклоненный кверху, будет содержать ионы с меньшей массой, а луч менее отклоненный — с большей. В результате весь полувеер окажется расчлененным на два неодинаково выгнутых полувеера, которые расположатся один над другим и будут соприкасаться только по линии неотклоненного луча, образованного ионами с большой скоростью (рис. 339). Если среди частиц присутствуют ионы с массой m_3 , то полувеер лучей, возникший в электрическом поле, в магнитном распадается на три, расположенных друг над другом и т. д. Изображение на фотопластинке, помещенной перпендикулярно к лучам, будет иметь вид парабол, число которых равно числу ионов с различными значениями $\frac{m}{e}$; узкая полоска, вырезанная на некотором расстоянии от неотклоненного пятна, представляет собой *масс-спектрограмму* (рис. 340 и 341). Измеряя расстояние между линиями в масс-спектрограмме, устанавливают соотношение масс ионов.

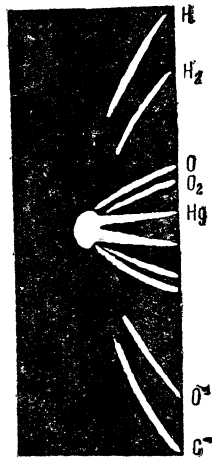


Рис. 340. Параболы Томсона.

Если в анализируемом потоке имелись ионы различных газов, то число парабол становится очень большим и масс-спектрограмма

состоит из множества линий. Но даже в том случае, когда анализируются ионы химически простого вещества, масс-спектрограмма все же состоит из нескольких близко расположенных линий. Это показывает, что химические элементы часто состоят из нескольких групп частиц, различающихся по массам, — *изотопов*.

Разброс тождественных по массе, но движущихся с разными скоростями ионов в вытянутые параболические полувееры уменьшает интенсивность линий в масс-спектрограмме и создает трудности в определении масс. Астон получил более отчетливые масс-спектрограммы, видоизменив томсоновский метод так, чтобы все частицы тождественной массы (вернее, с одинаковым отношением $\frac{m}{e}$), но с разными скоростями оказывались снова собранными, *сфокусированными* в тонкие и короткие пучки, создающие на фотопластинке интенсивные, резко очерченные линии.

В масс-спектрографе Астона фокусировка тождественных ионов с различными скоростями достигается тем, что магнитное поле расположено поперечно к электрическому и поэтому отклоняет ионы *в той же плоскости*, как и электрическое (а не в перпендикулярной плоскости, как в томсоновском методе парабол), но в *противоположную сторону*.

Другое решение той же задачи повышения интенсивности и резкости масс-спектральных линий было дано почти одновременно с Астоном (в 1918 г.) Бэйнбриджем. В масс-спектрографе Бэйнбриджа (рис. 342) пучок ионов проходит через две узкие щели S_1 , S_2 и попадает в пространство между пластинами конденсатора P_1 , P_2 .

Этот конденсатор расположен в поперечном магнитном поле, перпендикулярном к плоскости чертежа. Отклонение пучка ионов, создаваемое магнитным полем, противоположно отклонению в электрическом, поэтому, выбирая определенным образом соотношение между напряженностями этих полей, можно добиться, что через третью узкую щель S_3 будут проходить ионы, обладающие одинаковой заданной скоростью и различающиеся только по массам. Поэтому описанное устройство называют *фильтром скоростей*. Выходя из фильтра скоростей через щель S_3 , пучок ионов разной массы попадает в интенсивное однородное магнитное поле (с напряженностью 15 000 э), образованное большим электромагнитом с полюсами диаметром 40 см при межполюсном расстоянии порядка 2 см. В этом магнитном поле траектории ионов (до попадания на

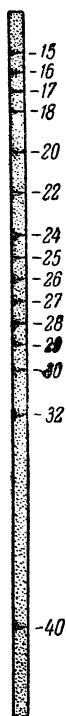


Рис. 341.
Масс-спектрограмма.

фотопластинку) имеют вид полуокружностей с радиусами

$$R = \frac{m}{e} \frac{v}{H}.$$

Вследствие тождественности скоростей всех ионов эти радиусы пропорциональны их массам. Поэтому линии масс-спектрограммы, полученной при помощи прибора Бэйнбриджа, размещены на расстояниях, строго пропорциональных массам ионов.

Дальнейшие усовершенствования масс-спектрографов, внесенные Маттаухом и др., заключались в применении ионооптических систем (§ 15), фокусирующих ионы, имеющие не только различные скорости (при одинаковом отношении $\frac{m}{e}$), но и летевшие сначала в несколько различных направлениях. Переход к таким приборам с двойной фокусировкой в известной мере аналогичен переходу в фотографии от камеры обскуры без линзы к камере с объективом. Введением усовершенствований удалось одновременно повысить интенсивность линий масс-спектрограммы («светосилу» аппарата) и увеличить расстояние между линиями, которые принадлежат смежным по массе изотопам (т. е. увеличить разрешающую способность аппарата).

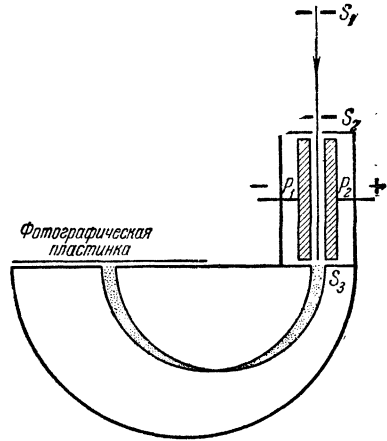


Рис. 342. Схема масс-спектрографа Бэйнбриджа.

Лучшие масс-спектрографы позволяют измерять массы ионов с точностью до пятого-шестого десятичного знака. Понятно, что при этом измеряется только отношение масс. Для полного единообразия всех масс-спектральных измерений принято считать массу атома основного изотопа кислорода O^{16} в точности равной 16 единицам, а массы всех остальных частиц сопоставлять с указанной «эталонной массой».

По соотношению интенсивностей линий в масс-спектрограмме можно судить о процентном содержании частиц разной массы в анализируемом потоке ионов. Для более точного анализа процентного состава потока ионов применяют особые приборы — масс-спектрометры. В масс-спектрометрах число ионов определенной массы оценивают по их суммарному заряду, который измеряют чувствительным гальванометром.

На рис. 343 представлена схема масс-спектрометра Блэки. Ионизация изучаемого вещества производится в пространстве между

электродами P_1 и P_2 и вызывается потоком электронов, движущихся перпендикулярно к плоскости чертежа и пересекающих эту плоскость в точке S (фокусировка пучка электронов на точке S осуществляется магнитным полем соленоида J). Образующиеся в этой области ионы втягиваются слабым электрическим полем в щель пластины P_2 . Далее эти ионы, имеющие почти одинаковые скорости, ускоряются сильным электрическим полем между P_2 и P_3 , и, проходя щель P_3 , попадают в поперечное магнитное поле. Совокупное действие приводит к расщеплению потока ионов на пучки с различными массами. Подбирая должным образом напряженности магнитного и электрического полей, можно добиться, что,

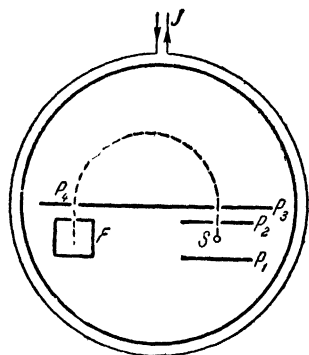


Рис. 343. Схема масс-спектрометра Блэки.

описав полуокружность, ионы с определенной массой попадут через щель P_4 в цилиндр Фарадея F , стекание заряда с которого измеряется гальванометром.

§ 86. Состав ядер. Изотопы. Атомные единицы массы и энергии

Изучение масс-спектрограмм позволило устанавливать состав ядер. Это, однако, оказалось возможным только после того, как были открыты (в начале 30-х годов) нейтроны (§ 90) и выяснилось, что ядра состоят из протонов и *нейтронов* — незаряженных частиц, обладающих массой, близкой к массе протона, имеющих, так же как и протон и электрон, спин, равный $\frac{1}{2}$ (в единицах $\frac{h}{2\pi}$), и магнитный момент, несколько меньший, чем у протона (почти в 1000 раз меньший, чем у электрона).

В первый период развития ядерной физики считали, что ядра состоят из протонов и электронов и заряд ядра равен разности числа протонов и числа электронов. Однако по мере накопления экспериментальных данных стало выясняться, что такое представление о строении ядра находится в противоречии с опытом.

Действительно, атомные ядра имеют магнитные моменты по порядку величины такие же, как у протона и нейтрона; это было бы необъяснимо, если предполагать, что внутри ядер находятся электроны, магнитные моменты которых в 1000 раз больше. Предположение о наличии электронов в ядрах противоречит также экспериментально наблюдаемым значениям их спинов ¹⁾.

¹⁾ Например, по спектроскопическим данным найдено, что спин ядра ${}^7\text{N}^{14}$ равен 1. Если бы в ядре находились электроны (т. е. ядро состояло бы из 14 про-