

Я. ХУРГИН

**О ВЕРХНЕМ ПРЕДЕЛЕ ЭНЕРГИЙ ИОНОВ, МОГУЩИХ БЫТЬ  
ПОЛУЧЕННЫМИ ПРИ ПОМОЩИ ЦИКЛОТРОНА**

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 15 III 1938)

Наиболее мощным способом получения ионов большой энергии является в настоящее время применение циклотрона — прибора, изобретенного Лауренсом<sup>(1)</sup>. Этот прибор основан на следующем принципе. Как известно, ионы, движущиеся перпендикулярно к однородному магнитному полю, описывают окружности, причем период обращения при малых энергиях ионов (по сравнению с  $m_0c^2$ ) не зависит от энергии и равен

$$T = \frac{2\pi mc}{eH}. \quad (1)$$

Благодаря этому можно воспользоваться переменным напряжением высокой частоты с периодом  $\tau = T$  для многократного ускорения ионов. Таким образом например сам Лауренс с сотрудниками<sup>(2)</sup> получили, имея первичное напряжение (высокой частоты), приблизительно равное 100 kV, окончательную энергию однозарядных ионов в 6 eMV, т. е. работали с шестидесятикратным ускорением. Естественно возникает вопрос, как далеко можно пойти, применяя принцип циклотрона, т. е. имеет ли энергия ионов, получаемых при помощи этого прибора, верхний предел. Простые рассуждения показывают, что такой предел действительно существует.

Как указал Лауренс, циклотрон обладает фокусирующими свойствами, т. е. расходящийся пучок ионов, выходящий из источника, пройдя циклотрон, снова концентрируется. Фокусировка эта по различным направлениям происходит различным образом. Фокусировка ионов, расходящихся в основной плоскости прибора, происходит благодаря известному свойству магнитного поля собирать ионы, после того как они прошли  $1/2$ , 1,  $3/2$  и т. д. доли окружности. Фокусировка же ионов, расходящихся перпендикулярно основной плоскости прибора, происходит двойко. На внутренних оборотах главную роль играют поля между краями ускоряющих дуантов, представляющие собой цилиндрические электрические линзы. На внешних же оборотах главную роль в фокусировке играет неоднородность магнитного поля. Благодаря падению магнитного поля от центра к краям появляются радиальные составляющие поля. Эти составляющие вблизи основной плоскости прибора возрастают пропорционально расстоянию от нее, имея по обе ее сто-

роны различные направления. Ионы отклоняются радиальными составляющими поля, и притом, если поле падает от центра к краям, то отклонение происходит по направлению к основной плоскости прибора, если же поле возрастает от центра к краям, то отклонение всегда происходит от основной плоскости. Поэтому магнитное поле должно от центра к краю либо убывать либо в крайнем случае слегка возрастать, причем такое возрастание поля влечет за собой резкое уменьшение тока, даваемого циклотроном.

Формула (1) является формулой приближенной, применимой лишь для ионов малых скоростей, при больших же скоростях она должна быть заменена такой:

$$T = \frac{2\pi m_0 c}{eH \sqrt{1-\beta^2}} \quad (2)$$

Обе причины, т. е. ослабление магнитного поля к краю прибора и увеличение массы иона при увеличении его скорости, влечут за собой увеличение периода его обращения и следовательно расстраивают резонанс. Эта расстройка резонанса может быть легко подсчитана для того случая, когда приращение энергии при каждом отдельном ускорении невелико, благодаря чему уравнение в конечных разностях может быть заменено дифференциальным, причем ошибка не будет слишком велика. Очевидно, что в реальных циклотронах это приближение допустимо, так как число ускорения велико. Тогда если ускоряющее напряжение синусоидально:

$$V = V_0 \cos \vartheta, \quad (3)$$

где  $\vartheta$  — фаза ускоряющего напряжения, то эта фаза, а следовательно и ускоряющее напряжение изменяются на различных витках спирали, описываемой ионом. Очевидно, что изменение фазы не может превышать  $\pi$ , причем в этом случае ток будет уже равен нулю. Если магнитное поле однородно, причем оно в центре больше резонансного настолько, что при выходе ионов из прибора фаза ускоряющего напряжения равна фазе ускоряющего напряжения в начале движения, т. е.  $\frac{\pi}{2}$  (это наиболее выгодный случай), то тогда число сделанных оборотов, а следовательно и максимальная энергия ионов имеют предел. Предельная энергия равна:

$$w = 4m_0 c^2 \left\{ \frac{eV_0}{\pi m_0 c^2} + \sqrt{\frac{eV_0}{\pi m_0 c^2} + \left(\frac{eV}{\pi m_0 c^2}\right)^2} \right\} \quad (4)$$

Если принять  $V_0 = 100$  kV, то предельная энергия ионов, получаемых при помощи циклотрона, равна 21.9 eMV для протонов, 31.0 eMV — для дейтонов и 62.0 eMV для  $\alpha$ -частиц. Если магнитное поле будет уменьшаться от центра к краям, то пределы соответственно снизятся. С помощью циклотрона, магнит которого имеет следующие данные:  $H_0 = 13\,000$  гауссов (напряжение магнитного поля в центре),  $\frac{\Delta H}{H_0} = 1\%$  (падение поля от центра к краям), наибольший диаметр траектории иона  $2R = 100$  см, можно получить протоны, энергия которых будет равна 13.7 eMV, причем ток будет идти в течение 38% полупериода. Магнитная фокусировка при этом будет еще достаточной. Для сравнения можно указать, что, как показывает расчет, в циклотроне самого Лауренса ионный ток идет в продолжение 22% полупериода, правда, при несколько лучшей магнитной фокусировке. Таким образом, как

мне представляется, в ближайшее время не приходится опасаться лимитирования мощности циклотрона изменением массы ионов со скоростью.

Примечание. Эта работа была почти закончена, когда появилась заметка Бете и Розе<sup>(3)</sup>, разбивавших тот же вопрос сходным методом, но пришедших к существенно иным результатам. Предел энергии ионов по их вычислениям лежит значительно ниже (приблизительно в 2 раза). Причина этого заключается в том, что Бете и Розе в своих вычислениях допускают максимальное смещение фазы на  $\frac{\pi}{6}$ , что очевидно слишком мало. С этим связана и другая допущенная ими ошибка, а именно: они полагают ускоряющее напряжение постоянно равным  $V_0$ . Обе эти причины, вместе взятые, должны уменьшить предел энергии в  $\sqrt{\frac{12}{\pi}}$  раз, т. е. приблизительно вдвое.

Физико-технический институт.  
Ленинград.

Поступило  
15 III 1938.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> E. O. Lawrence a. N. F. Livingston, Phys. Rev., **40**, 49 (1932).  
<sup>2</sup> E. O. Lawrence a. Donald Cooksey, Phys. Rev., **50**, 1131 (1934).  
<sup>3</sup> Bethe a. Rose, Phys. Rev., **52**, 42 (1937).