ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Том 206 1973

ФОКУСИРОВКА ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПОВОРОТНЫМ МАГНИТОМ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ГРАНИЦАМИ ВХОДА И ВЫХОДА

Ю. П. ХАРИТОНЕНКО, А. И. КОМОВ, Н. В. ПИРОГОВ

(Представлена научным семинаром объекта «Циклотрон»)

До настоящего времени на циклотроне НИИ ЯФ для поворота выведенного пучка применялся секторный магнит типа СП-45 с углом раствора, равным 19°. Его основными недостатками являются:

1. Сильная горизонтальная аберрация, вызванная неравенством длин траекторий крайних ионов в поле магнита.

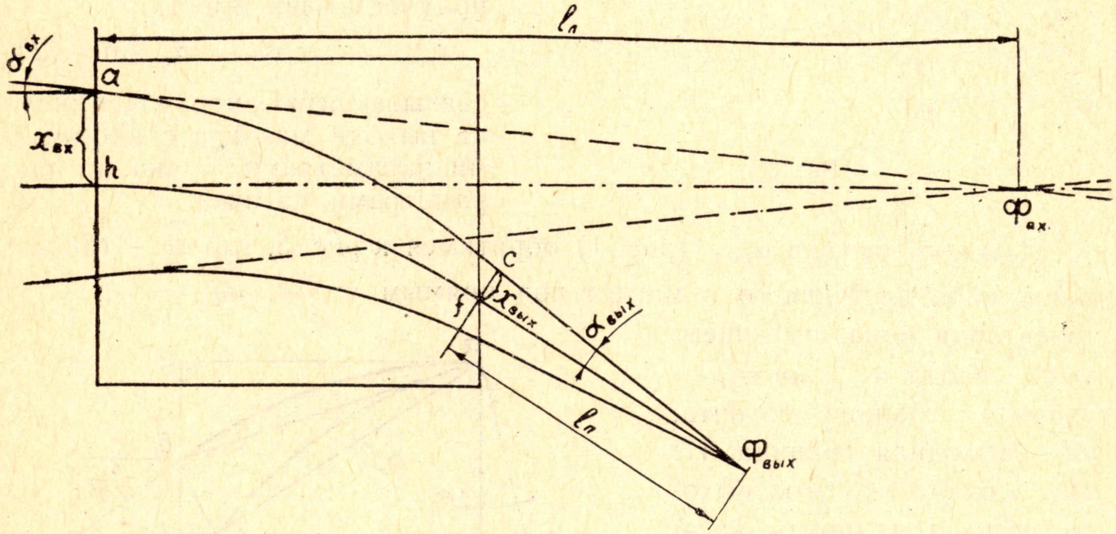

Рис. 1

2. Сильное приближение фокуса [1].

3. Невозможность получения точечного фокуса при углах поворота пучка, не равных углу сектора магнита.

От этих недостатков в значительной мере свободнее поворотный магнит с параллельными границами входа и выхода. Ниже приводится расчет параметров пучка, прошедшего через такой магнит. Будем считать, что на движение ионов в вертикальной плоскости магнит влияния не оказывает, и рассмотрим движение ионов в медианной плоскости (рис. 1).

Пусть на вход поворотного магнита поступает пучок ионов с апертурой $2x_{вх}$ и углом сходимости $2\alpha_{вх}$. Ось пучка перпендикулярна входной границе магнита. В зазоре магнита создано поле напряженностью

H. Ионы с энергией E движутся в поле магнита по дуге φ с радиусом ρ, определяющимся [2] из соотношения:

$$H\rho = \frac{1}{0{,}3z}\sqrt{E^2 + 2EE_0}\ ,$$

где z — кратность заряда иона заряду электрона;
E_0 — энергия покоя иона ($Мэв$);
$H\rho$ — магнитная „жесткость" частицы [$кэ \cdot см$].

Для определения апертуры пучка на выходе поворотного магнита обратимся к рис. 2, где $x_{вых} = cf$ (сравни с рис. 1).

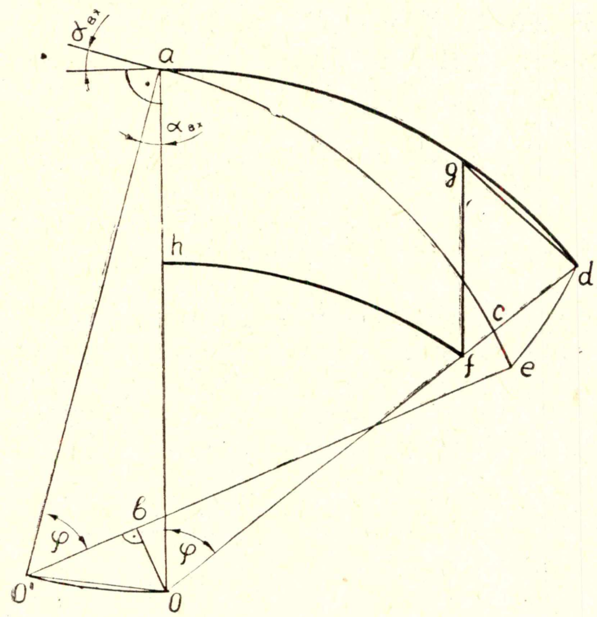

Рис. 2

В силу того, что $\alpha_{вх} \ll \varphi$ заменим дуги o′o и gd соответствующими хордами, а углы $ao'o$, aoo', fdg будем считать прямыми. Тогда из Δfdg имеем:

$$x_{вых} = cf = gf\cos\varphi - cd. \quad (1)$$

Хорда $o'o \approx \overset{\frown}{o'o} = \rho\alpha_{вх}$. Из прямоугольного $\Delta obo'$

$$o'b = o'o\sin\varphi = \rho\alpha_{вх}\sin\varphi.$$

Полагая далее $be \approx oc$, имеем $o'b = cd$. Теперь, с учетом (1), получаем зависимость

$$x_{вых} = x_{вх}\cos\varphi - \rho\alpha_{вх}\sin\varphi, \quad (2)$$

связывающую апертуру пучка на выходе магнита с входными параметрами пучка и параметрами магнита.

Для вывода угла $\alpha_{вых}$ (рис. 1) обратимся к рис. 3, где $\overset{\frown}{ab}$ — траектория иона, влетающего в магнит под прямым углом, $\overset{\frown}{ad}$ — траектория иона, имеющего угол входа $\alpha_{вх}$. $ao = \rho$ — входная граница магнита, bd — выходная граница. Из рис. 3 видно, что угол выхода есть угол между касательными, проведенными к траекториям ионов в точках b и d. Очевидно также, что угол между касательными в точках b и d равен углу входа, а следовательно, угол между касательными в точках c и d равен разности углов выхода и входа и равен углу $co'd$.

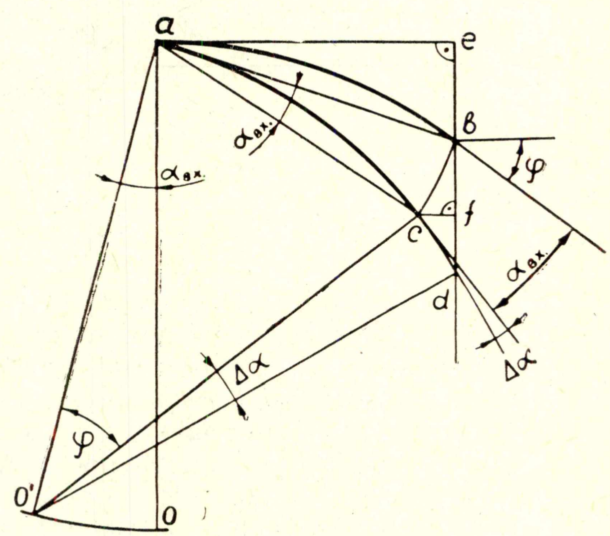

Рис. 3

Поскольку $co' = do' = \rho$, то $\Delta\alpha$ будет определен после нахождения длины дуги $\overset{\frown}{cd}$.

Дуга $\overset{\frown}{ab} = \varphi$ (по условию) и равна дуге $\overset{\frown}{ac}$ (по построению). В силу допущения $\alpha \ll \varphi$ заменим дугу bc хордой. А поскольку $\angle bac = \alpha_{вх}$, а хорды $ab = ac = 2\rho \sin \varphi/2$, то

$$bc = 2\rho\alpha_{вх} \sin \varphi/2. \tag{3}$$

$\angle cbd = \angle bae$ (стороны взаимно перпендикулярны), но $\angle bae$ (угол между касательной и хордой) равен половине дуги φ. Отсюда $\angle cbd = \varphi/2$. С учетом (3) имеем:

$$cf = 2\rho\alpha_{вх} \sin^2 \varphi/2,$$

$$\angle cdb \approx 90^\circ - \varphi - \alpha_{вх},$$

тогда

$$cd = 2\rho\alpha_{вх} \frac{\sin^2 \varphi/2}{\sin(90^\circ - \varphi - \alpha_{вх})},$$

а

$$\Delta\alpha = \frac{cd}{\rho} = 2\alpha_{вх} \frac{\sin^2 \varphi/2}{\sin(90^\circ - \varphi - \alpha_{вх})},$$

и наконец,

$$\alpha_{вых} = \alpha_{вх} + \Delta\alpha = \alpha_{вх}\left[1 + 2\frac{\sin^2 \varphi/2}{\sin(90^\circ - \varphi - \alpha_{вх})}\right]. \tag{4}$$

Теперь по известной апертуре пучка и углу его сходимости легко определить удаление фокуса повернутого пучка:

$$l_п = \frac{x_{вых}}{\alpha_{вых}} = l_л \frac{\cos\varphi - \frac{\rho}{l_л}\sin\varphi}{1 + 2\frac{\sin^2 \varphi/2}{\sin(90^\circ - \varphi - \alpha_{вх})}}. \tag{5}$$

В последнем равенстве угол $\alpha_{вх}$ следует учитывать лишь при $\varphi \to 90^\circ$, в остальных случаях им можно пренебречь.

В заключение отметим одно замечательное свойство описанного магнита. Если на его вход поступает плоскопараллельный пучок ($\alpha_{вх} = 0$), то будучи повернутым на любой угол $0 < \varphi < 90^\circ$, он остается плоскопараллельным [$\alpha_{вых} = 0$, (4)], в то время как его апертура уменьшается согласно (2). Из этой же формулы видно, что при повороте плоскопараллельного пучка на $\varphi = 90^\circ$ апертура пучка в плоскости поворота уменьшается до нуля.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Экспериментальная ядерная физика», под ред. Э. Сегре, т. 1, ИЛ, М., 1955.
2. Дж. Ливингуд. Принципы работы циклических ускорителей, ИЛ, 1963.