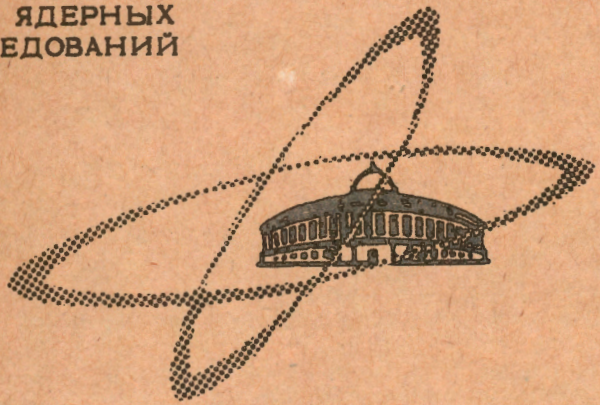


5405

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



P9 - 5405

ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

М.Л. Иовнович, Н.Б. Рубин, В.П. Саранцев

РАСЧЕТ ФАЗОВОГО ОБЪЕМА  
ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ СГУСТКОВ  
В КОЛЛЕКТИВНОМ УСКОРИТЕЛЕ  
И ВОПРОСЫ СЕПАРАЦИИ

1970

Расчёт фазового объема электронно-ионных сгустков  
в коллективном ускорителе и вопросы сепарации

Изучается движение протонов в плоскости заряженного кольца,  
ускоренного до высоких энергий. Вычисляется фазовый объем протонов.  
Рассмотрена сепарация вторичных частиц высоких энергий.

**Препринт Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна, 1970**

Ionovich M.L., Rubin N.B., Sarantsev V.P.

P9-5405

Calculation of the Phase Volume of the Electron-Ion  
Bunches in the Collective Accelerator and the  
Problems of Separation

Motion of protons in the plane of charged ring, accelerated up  
to high energies, is investigated. The proton phase volume is calcu-  
lated. Separation of high energy secondary particles is considered.

**Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.  
Dubna, 1970**

**P9 - 5405**

**М.Л. Иовнович, Н.Б. Рубин, В.П. Саранцев**

**РАСЧЕТ ФАЗОВОГО ОБЪЕМА  
ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ СГУСТКОВ  
В КОЛЛЕКТИВНОМ УСКОРИТЕЛЕ  
И ВОПРОСЫ СЕПАРАЦИИ**

Доклад, представленный на II Всесоюзное совещание  
по ускорителям заряженных частиц

Для экспериментального использования протонов, ускоренных до высоких энергий по методу коллективного ускорения<sup>/1/</sup>, необходимо определить разброс протонов по импульсам и фазовый объем протонного сгустка. Эти величины оценивались в работе<sup>/2/</sup>. Для уточнения оценок рассмотрим движение протонов в электронном сгустке. Протоны образуются в процессе ионизации атомов водорода в кольцевом сгустке релятивистских электронов и имеют достаточно малые скорости, сравнимые со скоростями атомов водорода. Образовавшийся протон испытывает действие электрического и магнитного полей электронного сгустка, а также внешнего магнитного поля, вдоль которого ускоряется сгусток. Рассмотрим кольцевой сгусток с числом электронов, меньшим чем  $10^{14}$  и малым радиусом  $a$ , много меньшим большого радиуса  $R$ . В этом случае для оценок можно пренебречь собственным магнитным полем по сравнению с внешним, а также кривизной кольца. В результате приходим к задаче о движении протонов в цилиндрическом потоке электронов, перпендикулярно оси которого (ось  $ou$ ) направлено внешнее однородное магнитное поле величины  $H_0$  (вдоль оси  $oz$ ). В системе покоя электронного сгустка уравнения для поперечного движения протона имеют вид:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x - \Omega \dot{y} = 0 ,$$

(1)

$$\ddot{y} + \Omega \dot{x} = 0 ,$$

где  $\omega_0^2 = \frac{2\pi e^2 n}{M}$  ,  $\Omega = \frac{e H_0}{M c}$  ,  $n$  - плотность электронов,  $M$  - масса протона. В качестве начальных условий примем  $x = x_0$  ,  $y = 0$  ,  $\dot{x} = \dot{y} = 0$ . Интегрируя второе, а затем первое уравнение (1), получим для координат и скоростей:

$$x = x_0 \frac{(1 + q \cos \omega t)}{1 + q} , \quad y = x_0 \frac{q}{(1 + q)^{3/2}} (\omega t - \sin \omega t) ,$$
(2)

$$\dot{x} = -x_0 \sqrt{\frac{q}{1 + q}} \omega_0 \sin \omega t , \quad \dot{y} = 2 \frac{\Omega q x_0}{1 + q} \sin^2 \frac{\omega t}{2} ,$$

где

$$\omega^2 = \Omega^2 (1 + q) , \quad q = \frac{\omega_0^2}{\Omega^2} = 2\pi \frac{M c^2 n}{H_0^2} .$$

Для рассматриваемого электронно-ионного сгустка  $q \gg 1$  . В этом случае выражение (2) принимает следующий вид:

$$x = x_0 \cos \psi , \quad y = x_0 q^{-1/2} (\psi - \sin \psi) ,$$

$$\dot{x} = -x_0 \omega_0 \sin \psi , \quad \dot{y} = 2 x_0 \Omega \sin^2 \frac{\psi}{2} ,$$
(3)

где  $\psi = \omega_0 t$  .

Время, в течение которого скорость протона достигает максимума, много меньше времени накопления и ускорения протонов. С помощью выражений (3) можно найти разброс протонов по поперечным импульсам в лабораторной системе координат:

$$\Delta p_x = 2M \omega_0 a, \quad \Delta p_y = 4M \Omega a. \quad (4)$$

Выражение для эмиттанса сгустка протонов:

$$\epsilon \approx \frac{\Delta p_x \Delta p_y}{p_0^2} S, \quad (5)$$

где  $p_0$  - продольный импульс протона, равный для ультрарелятивистского движения  $M c \gamma$ ,  $S$  - максимальная площадь поперечного сечения кольца, в рассматриваемом случае принимает вид:

$$\epsilon \approx \frac{32\pi R a^3 \omega_0 \Omega}{c^2 \gamma^2}. \quad (6)$$

Для сгустка с числом электронов  $5 \cdot 10^{13}$ ,  $N_0 = 2 \cdot 10^4$  э,  $\gamma = 10^3$  получаем  $\epsilon \approx 5 \cdot 10^{-2} (\text{мм. мрад})^2$ . Сравнение полученного эмиттанса ускоренного пучка с эмиттансом ускорителя с жесткой фокусировкой на такую же энергию показывает, что это величины одного порядка.

Помимо эмиттанса важной характеристикой пучков, получаемых на ускорителях, является их временная протяженность и, соответственно, "фактор заполнения".

Длина импульса  $\tau$  ускоренных частиц в коллективном ускорителе очень мала. Для энергии протонов 1000 Гэв  $\tau \approx 10^{-14}$  сек. Такая структура пучка имеет свои преимущества и недостатки. Преимущества проявляются во всех опытах с нейтрино, а также в ряде случаев при работе с пузырьковыми и искровыми камерами. Эксперименты, в которых традиционным способом используются счётчики и схемы совпадений, здесь требуют специальных разработок.

Эксперименты с пузырьковыми камерами требуют предварительной сепарации пучков вторичных частиц. Эта задача вообще весьма сложная при таких энергиях. Однако пучки, которые можно получить с помощью коллективного ускорителя, наиболее подходящи для этой цели ввиду их малой осевой протяженности. Схема сепарации проста. Частицы с одинаковыми импульсами и отличающимися массами после пролета определенной базы  $L$  разойдутся в продольном направлении на некоторое расстояние  $\Delta L$  из-за различия в скоростях. Далее располагается высокочастотное ускорительное-сепаратор, которое отклоняет частицы от оси. Если взять  $\Delta L = \frac{\lambda}{2}$ , где  $\lambda$  - длина волны в сепараторе, то частицы разных масс отклонятся от оси в противоположных направлениях, то есть произойдет их разделение. База

$$L = \frac{\lambda (pc)^2}{E_{02}^2 - E_{01}^2}, \quad (7)$$

где  $E_{01}$ ,  $E_{02}$  - энергия покоя рассматриваемых сортов частиц (см., например, /3/),  $p$  - импульс частиц.

Например, для отделения  $K$ -мезонов от  $\pi$ -мезонов при  $\lambda = 3$  см и  $\rho c = 500$  Гэв, получаем  $L \approx 30$  км, а для антипротонов  $L \approx 7,5$  км.

Для сокращения общих размеров сепарационной системы можно заставить вторичные частицы двигаться по замкнутым траекториям в магнитном поле. Возьмем для примера магнитную систему слабофокусирующего типа со сверхпроводящими магнитами и постоянным во времени магнитным полем  $H = 60$  кэ. Для  $E = 500$  Гэв радиус круговой траектории  $R_0 \approx 280$  м. При соответствующей коллимации вторичных пучков можно иметь амплитуду бетатронных колебаний  $a_b \approx 1$  см. Рассмотрим два варианта.

1. Частицы разных масс, вращаясь в магнитной системе, расходятся по азимуту. Если далее быстро уменьшить на небольшую величину магнитное поле, то отставшая частица не повторит траекторию передней частицы, и они выведутся из кольца по разным направлениям. Можно сделать проще: после вывода частиц по одной траектории использовать обычный сепаратор.

2. После инжекции частиц в кольцо включаются ускоряющие высокочастотные элементы. Тогда при прохождении частицами в кольце пути  $2L$  полезные частицы при соответствующем выборе фазы ускоряющего поля получают прибавку энергии и перейдут на больший радиус, а частицы с иной массой останутся на прежнем радиусе. Сдвиг по радиусу определяется формулой  $\frac{\Delta R_0}{R_0} = \frac{1}{(1-n)} \frac{\Delta p}{p}$ , где  $n$  - показатель магнитного поля,  $\frac{\Delta p}{p} \approx \frac{\Delta E}{E}$ ,  $E$  - энергия. При  $\Delta R_0 = 5$  см,  $n = \frac{2}{3}$ ,  $\frac{\Delta E}{E} \approx 6 \cdot 10^{-5}$  число оборотов для  $K$ -мезонов  $\approx 37$ , для антипротонов  $\approx 8$ . Полезные частицы, отделенные по радиусу от ненужных, выводятся далее из кольца.



Следует отметить, что интенсивность нестабильных частиц будет уменьшаться при рассмотренных больших длинах пробега. Рассматриваемое кольцо может быть использовано также как накопительная система для протонов, антипротонов и для осуществления их столкновения или как устройство, растягивающее протонный пучок во времени<sup>/2/</sup>.

#### Л и т е р а т у р а

1. В.И. Векслер и др. Коллективное линейное ускорение ионов. Атомная энергия, 24, 317 (1968).
2. D. Keefe. Symposium on Electron Ring Accelerators, p. 79, UCRL-18103, Berkeley (1968).
3. В.И. Котов, В.В. Миллер. Фокусировка и разделение по массам частиц высоких энергий. Атомиздат (1969).

Рукопись поступила в издательский отдел

14 октября 1970 года.