

## КОЛЛЕКТИВНОЕ УСКОРЕНИЕ ВСТРЕЧНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

И.В.Кузнецов, Э.А.Перельштейн, В.П.Саранцев,  
Г.Д.Ширков

Указан принципиально новый способ коллективного ускорения встречных ионных пучков в сжимающихся электронных кольцах. Проведенный анализ основных физических процессов и полученные ограничения на параметры ускоряемых ионов позволяют надеяться на достижимость светимости встречных ионных пучков  $\sim 10^{30}$   $1/\text{см}^2\text{с}$  в области энергий столкновений до 200 кэВ/нукл. Метод может найти применение в физике атомных столкновений и спектроскопии. Приведены примеры использования рассматриваемых встречных ионных пучков для физических экспериментов.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

### Collective Acceleration of Colliding Ion Beams

I.V.Kuznetsov et al.

A new in principle method of collective acceleration of colliding beams is suggested. The main physical processes and available accelerated ion parameters are analysed. The luminosity of colliding ion beams is estimated as  $\sim 10^{30}$  in the colliding energy region up to 200 keV/nucl. It overcomes the luminosity achievable in a collective accelerator without ordered azimuthal ion motion by a factor of 10 and energy by a factor of 20. The method may be used in the investigations of atomic physics processes and spectroscopy. Examples of using such colliding ion beams in the physical experiments are discussed.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

В последнее время исследования структуры сильноионизованных атомов, механизма их столкновения с нейтральными атомными системами ведутся в широкой области зарядностей и энергий бомбардирующих ионов<sup>1,2/</sup>. Интерес к изучению ион-атомных столкновений стимулируется фундаментальными и прикладными исследованиями в различных областях физики /квантовая электродинамика, управляемый термоядерный синтез, астрофизика и др./ . Дальнейшее развитие исследова-

ний взаимодействия многозарядных ионов с атомами и между собой определяется, в основном, возможностями получения интенсивных пучков ионов требуемой зарядности и энергии. В настоящее время эта задача решается двумя различными методами. Один из них состоит в генерации ионов любых зарядовых состояний, вплоть до ядер, полностью лишенных электронной оболочки, непосредственно в ионном источнике и ускорении их в обычном тяжелоионном ускорителе. Другой путь<sup>/3/</sup> заключается в ускорении ионов сравнительно низкой зарядности до высоких энергий, обдирке их на тонкой мишени и последующем замедлении уже высокозаряженных ионов.

Наиболее труднодоступными для исследования являются процессы взаимных столкновений многозарядных ионов. Использование метода пересекающихся ион-ионных пучков для этой цели будет в значительной мере ограничено его низкой чувствительностью и сложностью практической реализации. Светимость пересекающихся ионных пучков при  $\sim 10^6$  ион/см<sup>3</sup>, скорости ионов  $\sim 10^9$  см/с и поперечном сечении пучка  $\sim 0,1$  см<sup>2</sup> составит  $\sim 3 \cdot 10^{19}$  1/см<sup>2</sup>с. В связи с этим становится очевидной необходимость поиска более эффективных методов решения интересной и практически неизученной проблемы - исследования ион-ионных столкновений. Интересными с этой точки зрения являются сильноточные электронные пучки, так как они позволяют в принципе генерировать многозарядные ионы, удерживать их длительное время в некотором объеме, создавая ионные сгустки высокой плотности вплоть до  $\sim 10^{12}$  ион/см<sup>3</sup>. В работе<sup>/4/</sup> содержится предложение для организации ион-ионных столкновений при высоких энергиях использовать пространственный заряд электронного облака. На возможность применения электронно-лучевого метода ионизации для измерения эффективных сечений взаимной перезарядки многозарядных ионов указано в работе<sup>/5/</sup>. Электронные кольца коллективного ускорителя тяжелых ионов<sup>/6/</sup> также могут быть основой методики исследования ион-ионных взаимодействий. Плотности ионных сгустков в этом случае могут достигать  $\sim 10^{11}$  ион/см<sup>3</sup>. Однако энергия ионов/энергия колебания ионов в электронном кольце/ не превышает нескольких кэВ/нукл. В то же время в интенсивных электронных кольцах можно сформировать и ускорить встречные ионные пучки. Суть метода углового ускорения ионов при сжатии кольца<sup>/7/</sup> состоит в следующем.

В электронное кольцо инжектируют навстречу друг другу нейтральные атомы с определенной начальной скоростью. В результате их ионизации электронным ударом образуются ионы, которые захватываются собственным электрическим полем электронов на кольцевую орбиту и создают встречные ионные пучки. Удержание вращающихся ионов в кольце осуществляется электронами. При сжатии электронно-ионного

кольца в азимутально-однородном магнитном поле, нарастающим во времени, для вращающихся ионов выполняется закон сохранения обобщенного момента количества движения:

$$M_z = AMv_\theta r + \frac{eZ_i}{c} r A_\theta, \quad /1/$$

где  $A$  - массовое число иона,  $M$  - масса нуклона,  $v_\theta$  - скорость иона,  $r$  - радиус кольца,  $e$  - заряд электрона,  $c$  - скорость света,  $Z_i$  - зарядность иона,  $A_\theta$  - азимутальная компонента векторного потенциала магнитного поля.

Магнитное поле формируется так, что в процессе сжатия механический момент иона намного превышает вклад в обобщенный момент от магнитного поля. Такое условие, в частности, реализуется в адгезаторе коллективного ускорителя тяжелых ионов<sup>/6/</sup>. Тогда из /1/ следует приближенный закон сохранения механического момента, т.е. при сжатии электронно-ионного кольца скорость вращающихся ионов нарастает обратно пропорционально радиусу кольца.

Предельную скорость ионов можно найти из условия равенства центробежной и удерживающей сил, т.е.

$$\frac{AMv_\theta^2}{r} = 2Z_i \nu mc^2 \frac{x}{a^2} (1-f), \quad /2/$$

где  $m$  - масса электрона,  $f$  - параметр нейтрализации заряда кольца,  $x$  - радиальная поляризация электронно-ионного кольца /радиальное расхождение электронного и ионного колец/,  $\nu$  - параметр Будкера  $\nu = 2,8 \cdot 10^{-13} / 2\pi r$ ,  $N_e$  - число электронов в кольце,  $a$  - радиус малого поперечного сечения кольца.

Выражение /2/ позволяет определить предельную скорость ионов при инжекции нейтралов в кольцо на большом радиусе и достижимую в конце сжатия.

В коллективном ускорителе электронные кольца формируются из линейного электронного пучка в адгезаторе, состоящем из вакуумной камеры и системы токовых катушек, следующим образом. Сначала электронный пучок инжектируется в слабофокусирующее магнитное поле и сворачивается в кольцо. Затем в результате поочередного включения токовых катушек магнитное поле нарастает во времени и сжимает электронное кольцо.

Ниже приведены типичные параметры электронного кольца в начале и в конце сжатия.

	Начало сжатия	Конец сжатия
Число электронов в кольце	$10^{18}$	$10^{18}$
Энергия электронов	$1,5 \div 2$ МэВ	$1,5 \div 20$ МэВ
Радиус кольца	35 см	3,5 см
Радиус малого поперечного сечения	$1 \div 2$ см	$0,1 \div 0,2$ см
Индукция магнитного поля	$2 \cdot 10^{-2}$ Тл	$1,5 \div 1,7$ Тл

Скорость нейтральных атомов при инжекции в электронное кольцо должна быть  $\sim 10^7$  см/с. Плотность потока нейтралов можно найти из выражения

$$N_i = n_0 V n_e \sigma ct, \quad /3/$$

где  $N_i$  - число ионов, захваченных в кольцо;  $n_0$  - плотность потока нейтралов;  $V$  - объем пересечения потока нейтральных атомов и электронов;  $\sigma$  - сечение ионизации;  $t$  - длительность струи нейтралов. Если принять  $t = 5 \cdot 10^{-4}$  с,  $V = 10$  см<sup>3</sup>,  $n_e = 5 \cdot 10^9$  электрон./см<sup>3</sup>,  $\sigma = 2 \cdot 10^{-18}$  см<sup>2</sup> и  $N_i = 5 \cdot 10^{10}$ , то из /3/ находим, что  $n_0 = 3 \cdot 10^{10}$  ат./см<sup>3</sup>.

Электронно-ионные кольца во время сжатия поляризованы в радиальном направлении. Если в начале сжатия размеры сечений ионных пучков много меньше электронного размера, то допустима предельная относительная поляризация  $x/a$ , близкая к 1. При равных размерах сечений предельная поляризация  $\sim 0,25^{1/6}$ .

Из /2/ следует, что наиболее трудные условия для удержания ионов в начале сжатия, т.к. плотность электронов здесь наименьшая и зарядность ионов изменяется медленно. Характерное время ионизации  $\tau_i = (n_e \sigma c)^{-1}$  составляет в этот момент единицы миллисекунд. Считая, что увеличение заряда инжектированных ионов происходит за  $\tau_i$  и значение предельной относительной поляризации  $\sim 1$ , получаем ограничение на начальную скорость сжатия

$$v_r \leq \frac{r_0 [1 - (x/a)_0]}{r_i}. \quad /4/$$

Уменьшение радиуса кольца вдвое приводит к увеличению плотности электронов примерно на порядок, и с этого момента применима существующая на коллективном ускорителе магнитная система, которая позволяет в конце сжатия получить ионы высокой зарядности  $Z_i/A \geq 0,1$ .

Используя выражение /2/ и параметры электронного кольца в начале и в конце сжатия, можно оценить максимальные скорости ионов, при которых они еще будут удерживаться

в электронном кольце на радиусе 35 и 3,5 см. В таблице приведены значения этих скоростей, полученные при следующих значениях параметров электронно-ионных колец: на радиусе  $r = 35$  см  $f = 0,05$ ;  $x/a = 0,5$ ;  $a = 1,5$  см; на радиусе  $r = 3,5$  см  $f = 0,2$ ;  $a = 0,15$  см;  $x/a = 0,5$ . Для примера рассмотрено ускорение ионов азота, аргона, криптона, ксенона, свинца.

Таблица

A	$Z_i/A \cdot v_0 \cdot 10^7$ см/с	$E$ (кэВ/нукл.)	$Z_i/A$	$v_0 \cdot 10^8$ см/с	$E$ (кэВ/нукл.)
$r = 35$ см			$r = 3,5$ см		
14	$7 \cdot 10^{-2}$	9,8	5,1	0,36	218
40	$2,5 \cdot 10^{-2}$	5,9	1,8	0,18	109
84	$1,2 \cdot 10^{-2}$	4,1	0,9	0,15	91
136	$7,4 \cdot 10^{-3}$	3,2	0,5	0,14	85
208	$4,8 \cdot 10^{-3}$	2,6	0,34	0,12	73

Таблица показывает, что отношение предельно допустимых скоростей ионов в конце сжатия и в начале превышает 10, по крайней мере для ионов с  $A \geq 84$ , т.е. они будут ускоряться при сжатии и удерживаться в кольце даже при максимально возможных значениях скоростей.

Число ионов, циркулирующих во встречных пучках, можно определить, задав фактор нейтрализации  $f = (\sum Z_i N_i) / N_e$  и используя величину среднего заряда ионов. Например, для криптона в сжатом кольце может быть  $1,5 \cdot 10^{11}$  ионов с зарядом  $Z_i = 13$ , если  $N_e = 10^{13}$  и  $f = 0,2$ .

Принимая величину относительной скорости сталкивающихся ионов в конце сжатия  $v_{отн} = 8 \cdot 10^8$  см/с и плотности встречных пучков  $5 \cdot 10^{10}$  ион/см<sup>3</sup>, находим, что число ион-ионных взаимодействий в единицу времени составляет  $N = 4 \cdot 10^{30} \sigma$  столкн./с. Видно, что светимость встречных пучков  $4 \cdot 10^{30}$  1/см<sup>2</sup>с превышает на много порядков светимость пересекающихся пучков. Сравнение энергии и частоты столкновений ионов, совершающих хаотические колебания в электронном кольце, и ионов, взаимодействующих во встречных пучках, при условии их одинаковой плотности в кольце показывает, что встречные пучки обеспечивают выигрыш по энергии в 20-30 раз и по числу столкновений в единицу времени более чем в 10 раз.

Высокие скорости ионов и интенсивности встречных пучков позволят провести измерения сечений ионизации в ион-

ионных столкновениях, взаимной перезарядки многозарядных ионов, образования вакансий на внутренних атомных оболочках и исследовать механизм образования и распада квазимолекул при столкновении высокозаряженных ионов и т.д.

Наиболее простыми в реализации представляются эксперименты по измерению сечений ионизации и взаимной перезарядки сталкивающихся высокозаряженных ионов. В этом случае достаточно измерить спектр зарядностей ионов в зависимости от времени их удержания в электронном кольце. Для этого, прежде всего, необходимо осуществить вывод ионов из кольца в требуемый момент времени. Вывод ионов можно произвести, например, путем создания локальной компенсации пространственного заряда электронов в кольце. С этой целью потребуются струя нейтральных атомов с плотностью потока  $\sim 2 \cdot 10^{17}$  ат./см<sup>2</sup>с, если скорость нейтралов  $\sim 10^5$  см/с и из периметра кольца  $\sim 12$  см нейтрализуется участок  $\sim 0,6$  см. В месте компенсации заряда электронов ионы будут покидать кольцо по касательной к нему. Ларморовский радиус ионов  $\sim 20$  см, но магнитное поле спадает с увеличением радиуса, и поэтому вывод пучка из камеры не составит больших затруднений. Спектр зарядностей ионов в выведенном пучке можно будет измерить, например, с помощью электростатического анализатора.

Эксперименты по измерению сечений образования квазимолекул и вакансий на внутренних ионных оболочках можно будет провести на основе регистрации электромагнитного /оптическое, рентгеновское/ излучения, сопровождающего столкновение ионов. Первые экспериментальные результаты<sup>18/</sup> по измерению характеристического рентгеновского излучения ионов ксенона, наполняющих электронное кольцо, показали перспективность применения спектроскопических методов для исследования параметров электронно-ионных колец.

Возможности вывода интенсивных пучков сильноионизованных ионов из ускорителя, а для элементов легче криптона - даже ядер, полностью лишенных электронной оболочки, позволяют эффективно проводить эксперименты и в традиционной области исследования взаимодействий ионов с нейтральными атомами и веществом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Production and Physics of Highly Charged Ions. Proc. of an Int. Symp. Stockholm, June 1-5, 1982.
2. Atomic Collision Processes with Multiply Charged Ions. Proc. of the 2nd Workshop on Vinča Accel. Installation. Belgrad, 1983.

3. Mokler P.H. et al. Nucl.Instr.Meth., 1984, 232 (B4), p.34-39.
4. Janes G.S. et al. Phys.Rev., 1966, 145, p.925.
5. Донец Е.Д. ЭЧАЯ, 1982, т.13, с.968.
6. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.
7. Кузнецов И.В. и др. Авт.свид. СССР № 1102061 от 07.07.84. Бюл. ОИ, 1984, №25, с.196.
8. Zschornack G., Müller G., Musiol G. JINR, E9-12539, Dubna, 1979.

Рукопись поступила 15 мая 1985 года.