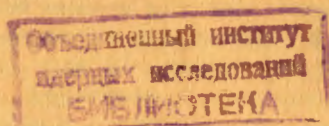


сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна



9-83-268

С.И.Козлов

О СЕЧЕНИЯХ ПЕРЕЗАРЯДКИ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ГАЗАХ

1983

При ускорении тяжелых ионов в циклотронах интенсивность пучка может снижаться как из-за нарушения временной и пространственной устойчивости движения частиц, так и вследствие перезарядки ионов на остаточном газе камеры ускорителя.

В настоящей работе представлен краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований сечений перезарядки тяжелых ионов на газах и даны оценки величин средних интегральных сечений перезарядки, полученных на основе экспериментальных зависимостей интенсивностей пучков ионов, ускоренных на циклотронах ЛЯР ОИЯИ, от давления в камере ускорителей.

Толщина газовой мишени для циркулирующего в циклотроне пучка приблизительно определяется выражением:  $d [\text{мол/см}^2] = 3,55 \cdot 10^{16} \times L [\text{см}] \times P [\text{Торр}]$ , где  $L$  - длина пути иона,  $P$  - давление в камере ускорителя. Эффективность ускорения пучка до конечной энергии:  $\eta = I/I_0 = \exp(-\alpha)$ , где  $I_0$ ,  $I$  - начальное и текущее значения интенсивности пучка соответственно;  $\alpha = d \cdot \sigma_t$ ,  $\sigma_t$  - полное сечение изменения заряда иона в процессе ускорения, включающее сечение потери ионом электрона  $\sigma_l$  и захвата  $\sigma_c$ .

Выразив длину пути через энергию, давление - через атомную концентрацию  $n^{(i)}$   $i$ -ой компоненты остаточного газа, можно получить следующее выражение для  $\alpha$ :

$$\alpha = K \sum_i n^{(i)} f(w), \quad (1)$$

где  $n^{(i)} = \frac{9,66 \cdot 10^{18} \mu^{(i)} \cdot P^{(i)}}{T}$ ,  $\mu^{(i)}$  - число атомов в молекуле остаточного газа,  $T$  - абсолютная температура стенок ускорителя,  $P^{(i)}$  - парциальное давление  $i$ -ой компоненты остаточного газа;

$K = \frac{9 \cdot 10^5 A^2}{K_w \cdot Z_i^2 \cdot V_g [\text{kВ}] \cdot H [\text{kЭ}]}$ , где  $A$  - масса,  $Z_i$  - заряд иона соответственно,  $V_g$  - напряжение на дуанте,  $H$  - значение среднего магнитного поля,  $K_w = 4 \sin \frac{\pi \phi_0}{2}$  - коэффициент, зависящий от номера гармоники ускоряющего напряжения  $\pi$  и азимутальной протяженности дуантов  $\phi_0$  в двухдуантной системе;  $f(w) = \int_0^w \sigma_t^{(i)}(w, Z_i, Z) \sqrt{w} dw$ .

Определение значения  $\alpha$  затрудняется тем фактом, что сечение перезарядки является сложной функцией энергии и заряда иона  $Z_i$ ,

заряда ядра атомов газовой мишени  $Z_T$ , заряда ядра ускоряемой частицы  $Z$ , т.е.  $\sigma_t = \sigma(W, Z_i, Z_T, Z)$ .

Экспериментальными и теоретическими вопросами описания ионных зарядовых состояний, которые возникают при ион-атомных столкновениях, занимались многие исследователи. Бором и Линдхардом в 1954 году<sup>/1/</sup> получены аналитические выражения для сечений потери  $\sigma_\ell$  и захвата  $\sigma_c$  электрона при прохождении ионом газовой среды:

$$\sigma_\ell = \pi a_0^2 \cdot Z_i^{-3} \cdot \left(\frac{v_0}{v}\right)^2 \cdot Z_T^{2/3} \cdot Z^{4/3},$$

/2/

$$\sigma_c = \pi a_0^2 \cdot Z_i^2 \cdot \left(\frac{v_0}{v}\right)^3 \cdot Z_T^{1/3},$$

где  $a_0 = 5,291 \times 10^{-9}$  см - боровский радиус,  $v_0 = 2,188 \times 10^8$  см/с,  $v$  - скорость иона. Однако дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования показали, что данное представление оказывается справедливым только в ограниченной области основных параметров. Из результатов экспериментов<sup>/2-6/</sup> следует, что в  $\sigma_c(Z_i) \sim$

$Z_i^{a_{c1}}$  значение  $a_{c1}$  изменяется от  $a_{c1} \approx 3,8$  /ионы Вг 13,9 МэВ/

до  $a_{c1} \approx 5,1$  /  $W = 25$  МэВ/ и слабо зависит от сорта газа ( $Z_T$ ).

В выражении  $\sigma_c(v) \sim v^{a_{c2}}$  значение  $a_{c2}$  увеличивается монотонно от  $1 \div 2$  при  $v/v_0 \approx 1$  до  $4 \div 6$  при  $v/v_0 \approx 4,5$ . Причем величина  $a_{c2}$  увеличивается наиболее сильно в легких, чем в тяжелых газовых мишенях. Что касается зависимости  $\sigma_c(Z_T) \sim Z_T^{a_{c3}}$ , то в работах Датца<sup>/2/</sup> и Моака<sup>/3/</sup> получено отношение сечений  $\sigma_c$  1:1,9 для ионов Вг с энергией 13,9 МэВ для гелиевой и аргоновой мишеней соответственно и 1:1,4 - для ионов J /110 МэВ/ в тех же газах. Отсюда следует значительная зависимость  $a_{c3}$  как от энергии ионов, так и от заряда ядра атома газовой мишени.

Общая функциональная зависимость сечения захвата электрона ионом может быть представлена в виде:

$$\sigma_c = K_c Z_i^{a_{c1}} \cdot v^{a_{c2}} \cdot Z_T^{a_{c3}},$$

/3/

где  $K_c$  - константа,  $a_{c1} = 4 \div 5$ ,  $a_{c2} = -1/2 \div 5/$ ,  $a_{c3} = 0,15 \div 0,4$ . Сечение потери ионом электрона  $\sigma_\ell$  уменьшается для ионов с более высокими зарядовыми состояниями, и это проявляется сильнее в легких газах, чем в тяжелых, что следует из рис.1, где приведены экспериментальные зависимости  $\sigma_\ell = f(Z_i)^{7,8/}$  для ионов азота с энергией 0,3 МэВ/нуклон в различных газах (He, N, Ar). Значение  $\sigma_\ell$

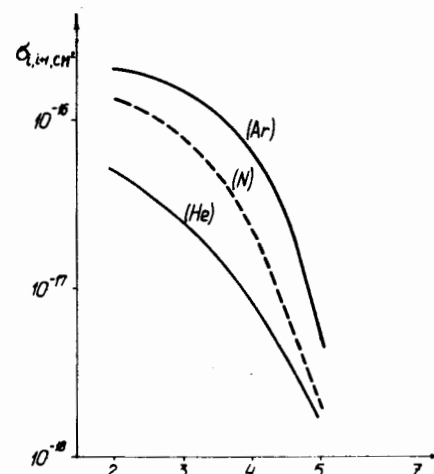


Рис.1. Зависимость сечения потери одного электрона ионами азота с энергией 0,3 МэВ/нуклон в разных газах.

увеличивается с  $Z_T$ , но для различных мишеней эта разница существенно зависит и от  $Z_i$  ( $\sigma_\ell \sim Z_i^{a_{\ell 1}}$  и  $a_{\ell 1} \sim (1 \div 3)$ ) и от скорости иона  $v$ .

Таким образом представляется, что сложные процессы ион-атомных столкновений в настоящее время недостаточно изучены из-за неполноты экспериментальных данных.

Теоретические же исследования в основном включают рассмотрение вероятности захвата и потери только одного электрона<sup>/9/</sup>, в то время как эксперименты показывают, что потеря множества электронов осуществляется с относительно высокой вероятностью. Так, отношение потерь  $\Delta_2$  двух электронов к потере одного электрона ионами J равно 60% в тяжелых газах ( $Z_T > 7$ ), 50% - в He, 25% - в  $H_2^{2/}$ . В общем, значение  $\Delta_2$  увеличивается с  $Z$  и  $Z_T$ , но уменьшается с увеличением скорости иона  $v$ . Зависимость  $\Delta_2$  от  $Z_i$  слабая.

В настоящее время наиболее полные расчеты эффективных сечений захвата и потери одного электрона ионами Ar, Kr, Xe, U различной зарядности при столкновении с атомами азота выполнены в работе<sup>/10/</sup>.

Сравнение этих данных с экспериментально полученными<sup>/11-13/</sup> показывает, что наблюдается хорошая корреляция, хотя значения полных сечений перезарядки, вычисленные теоретически, занижены, что может свидетельствовать о неучете некоторых факторов.

При ускорении тяжелых ионов на циклотронах ЛЯР У-200, У-300, У-400<sup>/14-16/</sup> измерения зависимостей интенсивности пучка ионов по радиусу при различных давлениях остаточного газа в камере циклотронов позволяют произвести оценки величин  $\sigma_t = F(W)$ , либо, что наиболее удобно для практического использования, значений среднего интегрального сечения изменения заряда иона при его ускорении в циклотроне от ионного источника до энергии

$$W_k - \bar{\sigma}(W_k) = \frac{1}{W_k} \int_0^{W_k} \sigma(W) dW.$$

На рис.2-5 приведены экспериментальные зависимости интенсивностей пучков ионов по радиусу от давления в камерах циклотронов ЛЯР, основные параметры которых, необходимые для оценки сечений перезарядки, следующие: У-300 -  $\phi_0 = 180^\circ$ ,  $v_g = 120$  кВ,

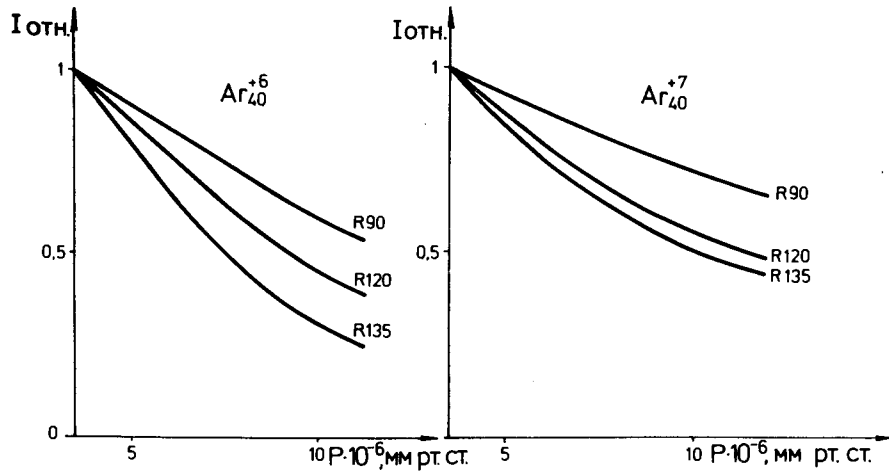


Рис.2. Зависимости интенсивности пучков ионов  $Ar_{40}^{+6}$  и  $Ar_{40}^{+7}$  на разных радиусах ускорения циклотрона У-300 от давления в камере ускорителя.

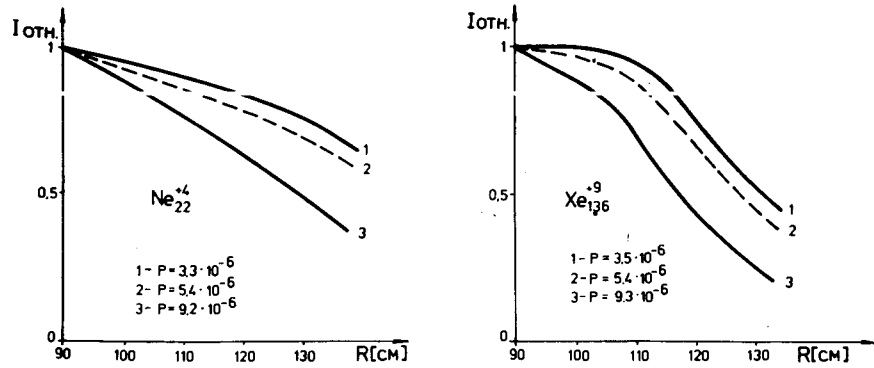


Рис.3. Зависимости интенсивности пучков ионов  $Ne_{22}^{+4}$  и  $Xe_{136}^{+9}$  от радиуса ускорения циклотрона У-300 при различных давлениях в камере циклотрона.

$H = 16,7$  кЭ, ионы  $Ne_{22}^{+4}$ ,  $Ar_{40}^{+6}$ ,  $Ar_{40}^{+7}$  ускорялись на основной гармонике высокочастотного напряжения ( $n=1$ ), ионы  $Xe_{136}^{+9}$  - на третьей ( $n=3$ ); У-400 -  $\phi_0 = 45^\circ$ ,  $v_g = 75$  кВ,  $H = 21$  кЭ,  $Mg_{26}^{+3}$  -  $n = 2$ ; У-200 -  $\phi_0 = 45^\circ$ ,  $v_g = 75$  кВ,  $H = 20$  кЭ,  $Xe_{132}^{+26}$  -  $n = 2$ . В последнем случае циклотрон У-200 использовался в качестве постускорителя тандем-циклотронов ЛЯР<sup>77</sup>, где инжектором ионов являлся циклотрон У-300.

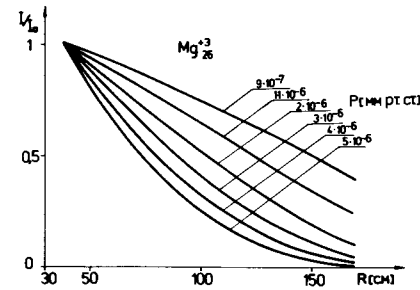


Рис.4. Зависимость интенсивности пучка ионов  $Mg_{26}^{+3}$  от радиуса ускорения циклотрона У-400 при различных давлениях в камере ускорителя.

Рис.5. а/ Зависимость интенсивности пучка ионов  $Xe_{132}^{+26}$  на разных радиусах ускорения циклотрона У-200 от давления в камере ускорителя; б/ зависимости расчетных<sup>10</sup> и экспериментальных значений  $\bar{\sigma}$  пучков ионов Хе от конечной энергии частицы.

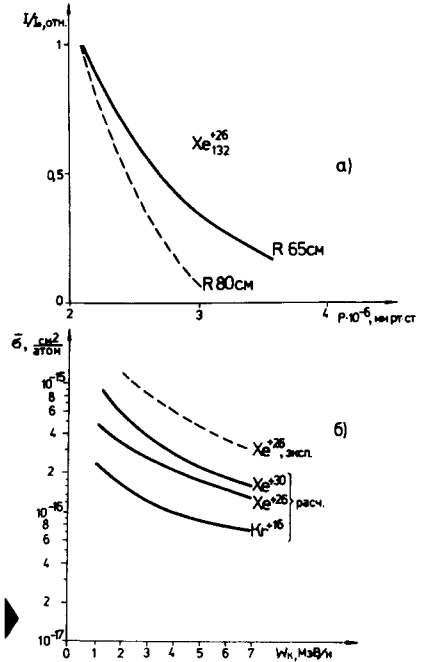
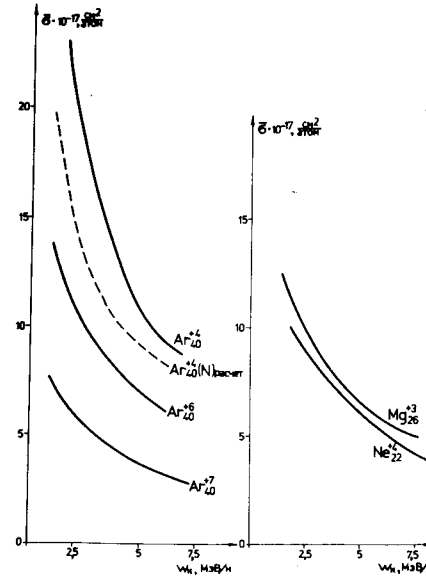


Рис.6. Зависимости средних интегральных сечений перезарядки ионов  $Ne_{22}$ ,  $Mg_{26}$ ,  $Ar_{40}$  от конечной энергии частиц.



Полученные экспериментальные зависимости  $\bar{\sigma} = F(W_k)$  /рис.5б,6/ позволяют сделать предварительный вывод о том, что интегральные сечения перезарядки тяжелых ионов ( $Ar$ ) уменьшаются с энергией как  $W_k^{-0,5}$ , и с зарядом ионов приблизительно как  $Z_i^{-(0,3 \div 1)}$ . Следует заметить, что в последнем случае особой регулярности не наблюдается, вероятно, из-за ограниченности экспериментальных данных. При сравнении зависимостей  $\bar{\sigma}$  для ионов  $Ar_{40}^{+4}$  и  $Ne_{22}^{+4}$  видно, что значения  $\bar{\sigma}$  прямо пропорциональны заряду ядра ионов.

Экспериментальные значения сечений перезарядки  $\bar{\sigma}$  оценивались для случая, когда давление в камере ускорителей в основном определяется азотом, что практически справедливо при получении из ионного источника таких ионов, как Mg. Однако при ускорении ионов газообразных элементов (Ne, Ar, Kr, Xe) частицы испытывают перезарядку как на атомах азота, так и на атомах рабочего газа ионного источника (Ne  $\rightarrow$  N, Ne; Ar  $\rightarrow$  N, Ar и т.д. Зависимость же сечений перезарядки от сорта газа ( $Z_T$ ) значительна, как указывалось выше.

Измерение парциального давления компонент остаточного газа в камере циклотрона У-400 при ускорении пучка ионов  $Ar^{+4}$  показало, что спектр остаточного газа довольно широк, но для оценок можно было принять, что основным компонентом является азот /~70%/.

Дополнительной погрешностью при оценке величин интегральных сечений перезарядки является непостоянство распределения давления по радиусу циклотрона, которое максимально в центральной области циклотрона / $3 \cdot 5 \times 10^{-6}$  мм рт.ст./, затем спадает до  $1 \cdot 10^{-6}$  к конечному радиусу /18/.

Полученные экспериментальные данные по сечениям перезарядки пучка на газе на циклотронах ЛЯР удовлетворительно коррелируют с теоретическими, что позволяет с хорошей надежностью оценивать уровень требуемого рабочего давления в камерах проектируемых циклотронов, предназначенных для ускорения очень тяжелых ионов вплоть до урана /19/.

Для получения более точных значений сечений перезарядки пучков тяжелых ионов на газах в дальнейшем планируются детальные исследования этого процесса на выведенном пучке циклотрона У-300 при использовании газовой ячейки с контролируемым давлением поступающего газа определенного сорта и следующего за ней магнита с большой разрешающей способностью по зарядам.

В заключение автор выражает благодарность профессору Ю.Ц.Оганесяну за постоянный интерес к работе, а также группам эксплуатации ускорителей ЛЯР за помощь в проведении экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bohr N., Lindhard J. Kgl.Danske Videnskab., Mat.-Fys.Medd., 1954, 28, No.7.
2. Datz S. et al. Phys.Rev., 1970, A2, p.430. ✓
3. Moak C.D. et al. Phys.Rev., 1968, 176, p.427. ✓
4. Betz H.D. et al. Phys.Rev., 1971, 3, p.197.
5. Salzborn E. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1976, NS-23, No.2, p.947.
6. Angert N. et al. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1972, NS-19, p.2.
7. Дмитриев И.С. и др. ЖЭТФ, 1962, 42, с.16.

8. Möller A. et al. Phys.Lett., 1968, 27A, No.9, p.621.
9. Шевелько В.П. Труды ФИАН, 1980, т.119, с.108.
10. Дмитриев И.С. и др. Препринт НИИЭФА Б-0407, л., 1978.
11. Hudson E.D. et al. Proc. of the Sixth Int. Cycl.Conf., Vancouver, 1972, p.274.
12. Franzke B. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1981, NS-28, No.3, p.2116.
13. Alonso J. et al. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1979, NS-26, No.3, p.3686.
14. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, 9-3988, Дубна, 1968.
15. Вялов Г.Н. Природа, 1966, № 10, с.42.
16. Флеров Г.Н. и др. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981, т.1, с.59.
17. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-6062, Дубна, 1971. ✓
18. Гульбекаян Г.Г. и др. ОИЯИ, 13-80-843, Дубна, 1980.
19. Оганесян Ю.Ц. и др. ОИЯИ, 9-82-756, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 апреля 1983 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

ДЗ-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
ДЗ,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Козлов С.И. 9-83-268  
0 сечениях перезарядки тяжелых ионов на газах

Рассматривается проблема, связанная с потерей частиц из-за перезарядки на остаточном газе камеры ускорителя. Дан краткий обзор теоретических и экспериментальных работ по определению зависимостей величин сечений перезарядки тяжелых ионов от заряда ядер частицы и атомов газовой мишени, заряда иона и его энергии. На основе экспериментальных зависимостей интенсивности пучков тяжелых ионов от радиуса ускорения при варьировании давления в камерах циклотронов ЛЯР У-200, У-300 и У-400 произведена оценка величин средних интегральных сечений перезарядки частиц на газе. Полученные результаты, хорошо коррелирующие с теоретическими значениями, позволяют с достаточной надежностью оценивать требуемый для высокоэффективного ускорения тяжелых ионов уровень рабочего давления в камерах циклотронов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Kozlov S.I. 9-83-268  
On Cross Sections of Heavy Ion Charge Exchange on Gases

The problem connected with the loss of heavy ions accelerated on the cyclotrons due to charge exchange of particles on the residual gas of the accelerator chamber is discussed. A short review of theoretical and experimental papers dealing with charge exchange cross sections of heavy ions passing through gas is presented. On the base of experimental dependences of the intensity of heavy ions beam on the accelerating radius when varying the pressure in the chambers of the U-200, U-300 and U-400 cyclotrons the estimation is made of average value of charge exchange cross sections of ions on gas. The experimental results having a reasonable agreement with theoretical ones give the possibility to estimate pressures in cyclotron chambers which are required to accelerate heavy ions with a desired reliability.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.