

Ордена Ленина

ИАЭ-3214

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

*SV 800 8906*

Н. И. Веников, И. С. Дмитриев,  
В. Е. Ярош

## **Перезарядка полутяжелых ионов при их ускорении в циклотроне**

Москва 1979

ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И. В. КУРЧАТОВА

Н.И.Веников, И.С.Дмитриев,  
В.Е. Ярош

ПЕРЕЗАРЯДКА ПОЛУТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ  
ПРИ ИХ УСКОРЕНИИ В ЦИКЛОТРОНЕ

Москва

1979

**Ключевые слова:** перезарядка, циклотрон, многозарядные ионы, сечения потерь ионов.

Описана методика расчета потерь полутяжелых ионов (литий и бериллий) при ускорении в циклотроне, подтвержденная результатами проведенных экспериментов.

Приведены зависимости зарядовых спектров этих ионов, получающиеся при перезарядке, от энергии и некоторые другие параметры взаимодействия полутяжелых ионов с веществом.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Ускоренные ионы лития и бериллия, получившие название "полутяжелых" [1], обладают рядом свойств, отсутствующих как у легких (изотопы водорода и гелия), так и тяжелых (изотопы бора и более тяжелые) ионов. Использование их в ядерной физике и прикладных исследованиях открывает новые интересные возможности. Однако ускорение этих ионов в циклотроне встречает много трудностей [2, 3]. Хотя ускорение многозарядных ионов лития и бериллия проводилось в 1958 г. на 72-см циклотроне НИИЯФ МГУ [4] для изучения средних потерь энергии, пробегов, среднего заряда и сечений перезарядки в различных средах [5-9], однако достигнутые при этом интенсивности и максимальные энергии выведенных ионов не были достаточны для проведения ядерно-физических экспериментов. Режим ускорения многозарядных ионов лития с высокой интенсивностью (на 7-8 порядков выше, чем в НИИЯФ МГУ) впервые в мире был получен в 1965 г. на циклотроне ИАЭ им. И.В.Курчатова. Результаты первых важных физических исследований с использованием этих ионов были опубликованы в 1967 г. [10]. Сейчас ионы лития ускоряются уже на нескольких циклотронах мира: в Беркли [11], Техасском [12] и Индианском [13] университетах,

в Карлсруэ [14] , однако по достигнутым интенсивностям ионов лития циклотрон ИАЭ существенно опережает перечисленные [15] .

Многозарядные ионы бериллия также впервые в мире были ускорены в циклотроне ИАЭ [10] , а с 1964 г. [16] с использованием этих ионов проводятся ядерно-физические исследования. В настоящее время эти ионы также ускорены на циклотронах в Беркли [11] и в Техасском университете [12] .

Проведение физических исследований на полутяжелых ионах, выбор параметров ускорителя и его наладка часто требуют знания многих параметров взаимодействия этих ионов с молекулами остаточного газа в ускорителе и с твердыми мишенями в широком диапазоне энергий ионов и их зарядов.

Имеющиеся данные по таким важным параметрам взаимодействия как сечения потери и захвата электронов, равновесные зарядовые спектры, пробеги, потери энергии, угловое рассеяние, опубликованы в различных работах и, как правило, не охватывают наиболее важные области энергии  $E/A$  выше 1 МэВ/нукл.

В связи с этим мы поставили цель - рассчитать сечения захвата и потери электронов полутяжелыми ионами с разной зарядностью в зависимости от энергий, разработать методику расчета потерь этих ионов при ускорении в циклотроне и с ее помощью оценить требования к вакууму в ускорительной камере циклотрона, рассчитать зарядовые спектры ионов, получающиеся после прохождения твердых мишеней, а также собрать данные по другим параметрам взаимодействия.

## 2. СЕЧЕНИЯ ПОТЕРИ И ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНОВ ПОЛУТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Основным компонентом остаточного газа в ускорительной камере циклотрона (без дополнительной подачи газа в источник ионов) является азот [18] . Поэтому были проведены расчеты сечений захвата

и потерь электронов для полутяжелых ионов разной зарядности в широком диапазоне энергий в азоте. Расчеты проведены с помощью разработанной методики, опубликованной ранее в [19].

Квантово-механические расчеты эффективных сечений потери и захвата электронов быстрыми многозарядными ионами чрезвычайно сложны и выполнены лишь для небольшого числа простейших случаев. Поэтому для практических целей были получены полуэмпирические соотношения, основанные на анализе установленных в эксперименте закономерностей и расчетов сечений этих процессов для простейших ионно-атомных систем.

В области высоких скоростей ионов за максимумом сечений потери электрона величины  $\delta_{q \rightarrow q+1}$  (где  $q$  — начальный заряд ионов) слабо зависят от начального состояния удаляемого электрона и определяется главным образом его энергией связи  $I_i$  и числом электронов во внешней оболочке иона  $Q$ . При этом значения  $\delta_{q \rightarrow q+1}$  удовлетворительно согласуются с борновскими расчетами для потери электрона водородоподобными ионами и может быть записано в виде

$$\delta_{q \rightarrow q+1} = 4\pi a_0^2 Q \cdot \frac{Z_c^2 + Z_c}{\left(\frac{I_i}{I_0}\right) \left(\frac{U}{U_0}\right)^2}, \quad (2.1)$$

где  $I_0 = 13,6$  эВ и  $U_0 = 2,19 \cdot 10^8$  см/с — энергия связи и орбитальная скорость электрона в атоме водорода;  $Z$  — заряд ядра мишени.

В области скоростей  $U$ , где величины  $\delta_{q \rightarrow q+1}$  близки к максимальным и борновские расчеты дают завышенные величины сечений, в основу метода расчета сечений  $\delta_{q \rightarrow q+1}$  были положены имеющиеся экспериментальные данные [20].

Для захвата электрона расчеты сечений  $\delta_{q \rightarrow q-1}$  для атомных ядер, а также анализ большого количества экспериментальных данных для многоэлектронных ионов позволили установить связь между сечениями перезарядки протонов  $\delta_{1 \rightarrow 0}$  ( $H^+$ ) и сечениями  $\delta_{q \rightarrow q-1}$  для многоэлектронных ионов [21].

Величины  $\sigma_{q \rightarrow q-1}$  существенно зависят от соотношения между скоростью иона  $U$  и средней орбитальной скоростью захватываемого электрона  $U_c$ . С наибольшей вероятностью захватываются электроны с  $U_c \sim U$ , причем их захват осуществляется преимущественно в состоянии иона с той же орбитальной скоростью.

В области больших скоростей, где электроны захватываются главным образом в основное состояние иона с зарядом  $q-1$  и энергией связи  $I_{q-1}$ , имеем следующее соотношение:

$$\sigma_{q \rightarrow q-1} = A(n) \sigma_{1 \rightarrow 0}(H^+) P_{q-1} \left( \frac{I_{q-1}}{I_0} \right)^\alpha, \quad (2.2)$$

где  $P_{q-1}$  - число незаполненных вакансий в основном состоянии иона с зарядом  $q-1$ . Показатель  $\alpha$  возрастает от 1-1,5 в области  $U = (2 \div 5) \cdot 10^8$  см/с до  $\alpha = 2,5$  при  $U > 2 \cdot 10^9$  см/с.

Коэффициент  $A(n)$  учитывает уменьшение сечений  $\sigma_{q \rightarrow q-1}$  с ростом главного квантового числа  $n$ . [21].

При уменьшении скорости ионов в область  $I = \frac{M}{2} U^2 < I_{q-1}$ , где захват осуществляется в возбужденные состояния, величины  $\sigma_{q \rightarrow q-1}$  могут быть оценены исходя из соотношения

$$\sigma_{q \rightarrow q-1} = \sigma_{1 \rightarrow 0}(H^+) q^2 \left( \frac{U}{2v_0} \right)^\beta, \quad (2.3)$$

где показатель  $\beta$  возрастает [22] от  $\beta = 1,75$  при  $U = 2 \cdot 10^8$  см/с до  $\beta = 3$  при  $U \geq 5 \cdot 10^8$  см/с.

Результаты расчетов сечений  $\sigma_{q \rightarrow q+1}$  и  $\sigma_{q \rightarrow q-1}$  приведены на рис. 1 и 2. Измерения соответствующих сечений для ионов лития в азоте получены при  $E/A \leq 0,75$  МэВ/нукл., для ионов бериллия - при  $E/A = 0,35$  МэВ/нукл. [7, 8]. Экспериментальные сечения достаточно хорошо (с точностью  $\sim 20\%$ ) совпадают с вычисленными.

### 3. ПОТЕРИ ПОЛУТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ПРИ ИХ УСКОРЕНИИ В ЦИКЛОТРОНЕ ИЗ-ЗА ПЕРЕЗАРЯДКИ НА ОСТАТОЧНОМ ГАЗЕ

Решая дифференциальное уравнение потерь ионов в процессе ускорения из-за перезарядки на фоне остаточного газа, можно получить выражение для доли потерянных частиц

$$\frac{\Delta N}{N} = 1 - \exp\left[-(2,1 \cdot 10^{27} \int_0^t p \beta \sigma_{ат} dt)\right], \quad (3.1)$$

где  $p$  - давление остаточного газа, торр;  $\beta = v/c$  - приведенная скорость;  $\sigma_{ат}$  - полное сечение перезарядки, т.е. сумма сечений потери и захвата электрона, см<sup>2</sup>/ат;  $t$  - время ускорения, с.

Для двухдуантного циклотрона

$$t = \frac{N h}{f}, \quad (3.2)$$

$$N = \frac{(E_k/A) A}{4 Z_e U_g \overline{\cos \varphi}}, \quad (3.3)$$

где  $N$  - число оборотов;  $E_k$  - конечная энергия иона, МэВ;  $A$  - массовое число иона;  $Z_e$  - заряд иона (в электронных зарядах);  $h$  - кратность ускорения;  $U_g$  - напряжение "дуант-земля", МВ;  $f$  - частота ускоряющего напряжения, Гц;  $\overline{\cos \varphi}$  - косинус фазы ускоряющего напряжения, усредненный за время  $t$ .

Имея в виду, что для циклотрона ИАЭ

$$f = 3,4 \cdot 10^6 h \sqrt{\frac{E_k}{A}}, \quad (3.4)$$

выражая  $t$  из равенств (3.2) - (3.4) и подставив его в (3.1),

имеем

$$\frac{\Delta N}{N} = 1 - \exp\left[-\frac{5,04 \cdot 10^{18} A}{Z_e U_g \overline{\cos \varphi} \sqrt{\frac{E_k}{A}}} \int_0^{\frac{E_k}{A}} p \sigma_{ат} \sqrt{\frac{E}{A}} d\left(\frac{E}{A}\right)\right], \quad (3.5)$$

Если принять, что давление остаточного газа не меняется в процессе ускорения ионов (это практически справедливо, когда разряд в источнике ионов происходит в парах соединений лития или бериллия без подпуска балластного газа), то (3.5) можно записать в виде

$$\frac{\Delta N}{N} = 1 - \exp \left[ -\alpha \cdot \rho \int_0^{E_k/A} \delta_{\text{от}} \sqrt{\frac{E'}{A}} d\left(\frac{E'}{A}\right) \right], \quad (3.6)$$

где

$$\alpha = \frac{5,04 \cdot 10^{18} A}{Z_e U_g \cos \varphi \sqrt{E_k/A}} \quad (3.7)$$

Произведения  $\delta_{\text{от}} \sqrt{\frac{E'}{A}}$ , характеризующие потери ионов из-за перезарядки в зависимости от энергии, для ионов лития и бериллия приведены на рис. 3 и 4 соответственно. Из этих рисунков видно, что потери из-за перезарядки "голых" ядер лития и бериллия ( $\text{Li}^{3+}$  и  $\text{Be}^{4+}$ ) существенны лишь в начале ускорения (в центральной области циклотрона), а ионов с меньшей зарядностью — на больших радиусах ускорения.

Выражением (3.6) удобно пользоваться для расчета доли потерянных ионов при ускорении, используя вычисленные из рис. 3 и 4 зависимости  $\int_0^{E_k/A} \delta_{\text{от}} \sqrt{\frac{E'}{A}} d\left(\frac{E'}{A}\right) = f\left(\frac{E}{A}\right)$  и приведенные на рис. 5 (для ионов лития) и рис. 6 (для ионов бериллия).

На циклотроне ИАЭ были проведены эксперименты по измерению значения  $\int_0^{E_k/A} \delta_{\text{от}} \sqrt{\frac{E'}{A}} d\left(\frac{E'}{A}\right)$  для ионов  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Li}^{2+}$ ,  $\text{Li}^{3+}$  и  $\text{Be}^{2+}$  при некоторых энергиях этих ионов. Изменялось давление остаточного газа в ускорительной камере циклотрона ( $P_1 \rightarrow P_2$ ) и измерялось изменение тока внешнего пучка ( $J_1 \rightarrow J_2$ ):

$$K = \int_0^{E_k/A} \delta_{\text{от}} \sqrt{\frac{E'}{A}} d\left(\frac{E'}{A}\right) = \frac{\ln \frac{J_1}{J_2}}{\alpha (P_2 - P_1)}, \quad (3.8)$$

где  $\alpha$  определялось из выражения (3.7).

### Относительная ошибка измерений

$$\frac{\delta K}{K} = \frac{1}{\ln \frac{J_1}{J_2}} \left( \frac{\delta J_1}{J_1} + \frac{\delta J_2}{J_2} \right) + \frac{\delta(P_2 - P_1)}{P_2 - P_1} + \frac{\delta U}{U} + \frac{\delta(\cos \varphi)}{\cos \varphi} \quad (3.9)$$

Результаты измерений и вычисленные ошибки приведены в таблице. Из таблицы видно, что результаты измерений совпадают с расчетами в пределах точности измерений, что дает основания пользоваться приведенной выше методикой для расчета потерь полутяжелых ионов в остаточном газе при ускорении в циклотроне.

Проведенный анализ потерь полутяжелых ионов из-за перезарядки на остаточном газе при ускорении в изохронном циклотроне ИАЭ до различных энергий (рис. 7 и 8) показал, что при условии идентичности орбит ионов (это определяется шелевыми диафрагмами на дуантах в центральной области циклотрона и амплитудой ВЧ-потенциала каждого дуанта  $U_d = 0,075 \cdot \frac{E_k}{qe}$ , МВ)

— потери ионов монотонно уменьшаются с уменьшением их энергии;

— потери ионов пренебрежимо малы в области рабочих давлений  $10^{-5} - 2 \cdot 10^{-5}$  торр для ионов  $Li^{3+}$ ,  $Li^{2+}$ ,  $Be^{3+}$ ,  $Be^{2+}$ ;

— потери ионов  $Li^+$  и  $Be^{2+}$ , ускоряемых на 3-й субгармонике ВЧ, становятся существенными в области рабочих давлений, особенно в начале рабочего диапазона энергий для этих ионов;

— потери ионов  $Be^+$ , ускоряемых на 5-й субгармонике ВЧ при давлении  $p > 10^{-5}$  торр и особенно при  $\frac{E_k}{A} < 1$  МэВ/нукл., катастрофически растут.

С целью снижения потерь ионов из-за перезарядки на остаточном газе в циклотроне ИАЭ при ускорении  $Li^+$  и  $Be^{2+}$  на 3-й субгармонике ВЧ удастся их пропустить в центре не через первую щель коллиматора, составленного из шелевых диафрагм, а через

$$K = \int_0^{E^*} \delta_{\text{ат}} \sqrt{\frac{E}{A}} d\left(\frac{E}{A}\right)$$

Результаты измерений

на циклотроне ИАЭ

Ион МэВ/нукл.	E/A	Относительная ошибка измерений, %					$\frac{\delta K}{K}$	$(K \pm \delta K)_{\text{изм.}}$ $\text{см}^2 / (\text{ат.МэВ})^{3/2}$	K расчет' $\text{см}^2 / (\text{ат.МэВ})^{3/2}$
		$\frac{\delta J_1 + \delta J_2}{J_1 + J_2}$	$\frac{\delta(P_2 - P_1)}{P_2 - P_1}$	$\frac{\delta U}{U}$	$\frac{\delta \cos \varphi}{\cos \varphi}$	$\frac{\delta K}{K}$			
${}^6\text{Li}^+$	1,67	4,5	2,5	4	5	16	$(11 \pm 1,7) \cdot 10^{-17}$	$9,4 \cdot 10^{-17}$	
${}^6\text{Li}^{2+}$	6	10	2,5	4	10	26,5	$(16 \pm 4) \cdot 10^{-17}$	$12 \cdot 10^{-17}$	
${}^6\text{Li}^{3+}$	15	25	2,5	4	5	26,5	$(5,9 \pm 2,1) \cdot 10^{-17}$	$4,3 \cdot 10^{-17}$	
${}^9\text{Be}^{2+}$	2,8	10	2,5	4	10	26,5	$(9,8 \pm 2,6) \cdot 10^{-17}$	$8,8 \cdot 10^{-17}$	

вторую при амплитудном значении ВЧ-потенциала и приблизительно в 2,2 раза более высоким, что примерно во столько же раз снижает потери из-за перезарядки.

Интересно отметить, что использование аксиальной инжекции полутяжелых ионов из внешних источников, хотя и не загрязняет циклотрон соединениями лития и бериллия, но приводит к большим потерям интенсивности из-за перезарядки при транспортировке низкоэнергетических высокозарядных ионов (имеющих очень высокое сечение захвата электронов, см. рис. 1 и 2). Например, при транспортировке ионов  $Li^{3+}$  из внешнего источника в циклотрон ИАЭ (минимальное расстояние  $\sim 4$  м) потери при вакууме  $2 \cdot 10^{-5}$  торр и энергии ионов  $\sim 50$  кэВ составили бы 70%, а для ионов  $Be^{4+}$  при этих же условиях - 97%. Это подтверждает правильность выбора способа ускорения полутяжелых ионов в циклотроне путем использования внутреннего источника и, по-видимому, объясняет чрезвычайно малые полученные интенсивности внешнего пучка ионов  $Li^{3+}$  в циклотроне с аксиальной инжекцией этих ионов из внешнего источника в Карлсруэ (более чем на порядок меньше, чем в ИАЭ).

#### 4. ЗАРЯДОВЫЕ СПЕКТРЫ ПОЛУТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Во многих физических экспериментах при использовании твердых прострельных мишеней необходимо знать зарядовый спектр пучка, испытывающего перезарядку в этой мишени. Экспериментальные данные для равновесного распределения по зарядам ионов лития были получены для твердых стрипперов при  $E \leq 5$  МэВ и для ионов бериллия при  $E \leq 7,15$  МэВ [23]. При этом при малой энергии значение среднего заряда  $\bar{q}$  в твердом веществе совпадает с соответствующей величиной  $\bar{q}$  в азоте в пределах 3%. В связи с этим для оценки относительных количеств  $F_q$  ионов с зарядом  $q$  в пучке, прошедшем твердое вещество, были использованы соотношения

$$F_{q-1} = F_q \frac{\delta_{q \rightarrow q-1}}{\delta_{q-1 \rightarrow q}}, \quad (4.1)$$

$$F_{q-2} = F_q \frac{\delta_{q \rightarrow q-1}}{\delta_{q-1 \rightarrow q}} \cdot \frac{\delta_{q-1 \rightarrow q-2}}{\delta_{q-2 \rightarrow q-1}}, \quad (4.2)$$

где  $\delta_{q \rightarrow q-1}$  — сечения потери и захвата электрона, приведенные на рис. 1 и 2. Рассчитанные зарядовые спектры на полутяжелых ионах вместе со средним зарядом приведены на рис. 9 и 10.

#### 5. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ, ПРОБЕГИ, УГЛОВОЕ УШИРЕНИЕ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СТРЕГГЛИНГ

Потери энергии полутяжелыми ионами и их пробеги в диапазоне энергий, обеспечиваемом циклотроном ИАЭ для твердых мишеней из  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{107}\text{Ag}$  и  $^{181}\text{Tl}$ , приведены на рис. 11-16 [24]. Для мишеней из элементов промежуточной массы потери энергии и пробеги могут быть легко определены интерполяцией. Потери энергии ионами  $^6\text{Li}$  и  $^9\text{Be}$  в некоторых газах приводятся в [24].

При прохождении через мишени качество ионного пучка ухудшается: увеличивается как угловой, так и энергетический разброс. Для подсчета среднеквадратичного угла рассеяния может быть использована простая формула [25], результаты вычислений по которой находятся в согласии с экспериментальными данными:

$$\langle \theta^2 \rangle^{1/2} = 0,5 \left[ \frac{Z_2 (Z_2 + 1)}{A_2} \right]^{1/2} \frac{Z_1 t^{1/2}}{E}, \quad (5.1)$$

где  $\langle \theta \rangle^{1/2}$  — полная ширина на полувьсоте углового разброса, мрад;  $t$  — толщина мишени, мкг/см<sup>2</sup>;  $Z_1, A_1$  — номер и массовое число элемента, ионы которого проходят через мишень;  $Z_2, A_2$  — номер и массовое число элемента, из которого изготовлена мишень.

Данных по увеличению энергетического разброса в пучке при прохождении мишени (из-за статистической природы механизма потерь энергии, так называемого энергетического стрегглинга) для полутяжелых ионов в литературе нет. В работе [26] с целью оценки стрегглинга для тяжелых ионов предлагается использовать выражение

$$\delta E = \Delta E \cdot \frac{2}{3} \frac{A_1 \cdot A_2}{(A_1 + A_2)^2} \quad (5.2)$$

для  $\Delta E / E \ll 1$ , где  $E$  - начальная энергия ионов;  $\delta E$  - стрегглинг;  $\Delta E$  - потери энергии при прохождении мишени;  $A_1$  и  $A_2$  - массовые числа для иона и материала мишени.

Однако это выражение для вычисления стрегглинга полутяжелых ионов во всем энергетическом диапазоне, обеспечиваемом циклотроном, еще требует экспериментальной проверки.

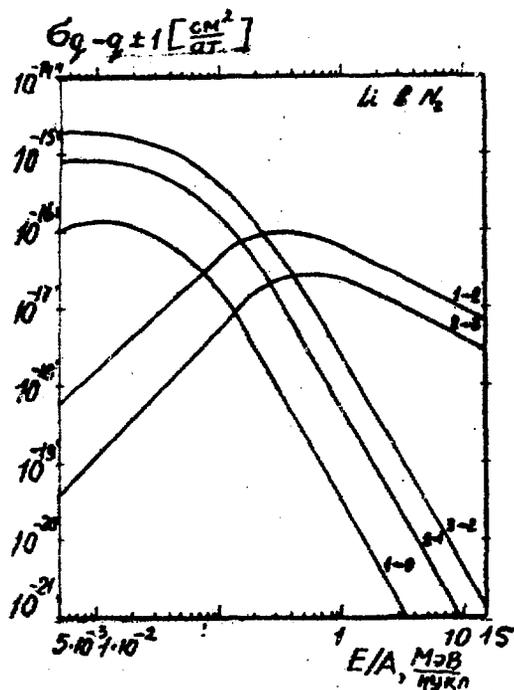


Рис. 1. Зависимость сечений захвата ( $\sigma_{q \rightarrow q-1}$ ) и потери ( $\sigma_{q \rightarrow q+1}$ ) электрона ионами лития в азоте от энергии

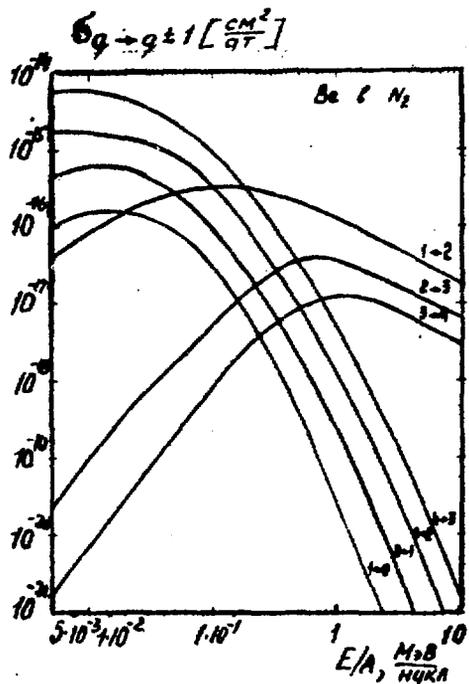


Рис. 2. Зависимость сечений захвата и потери электрона ионами бериллия в азоте от энергии

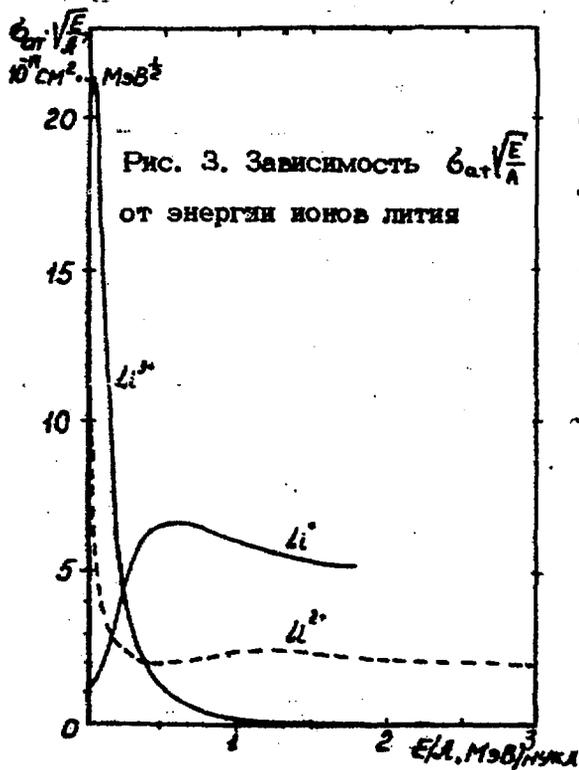


Рис. 3. Зависимость  $\sigma_{at} \sqrt{E/A}$  от энергии ионов лития

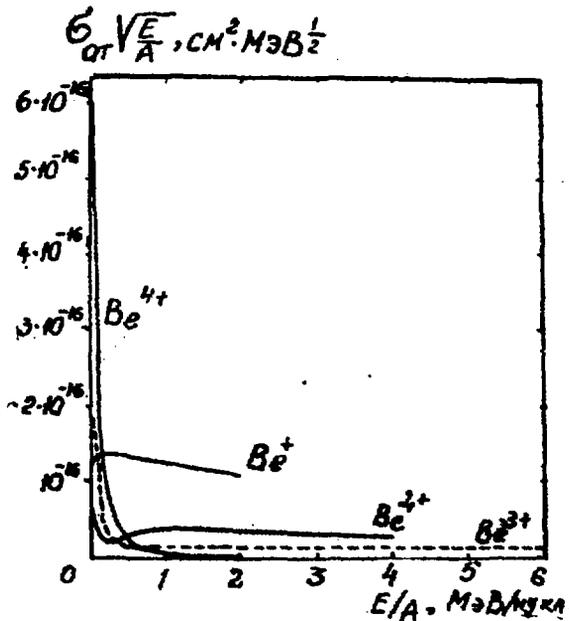


Рис. 4. Зависимость  $\sigma_{at} \sqrt{E/A}$  от энергии ионов бериллия

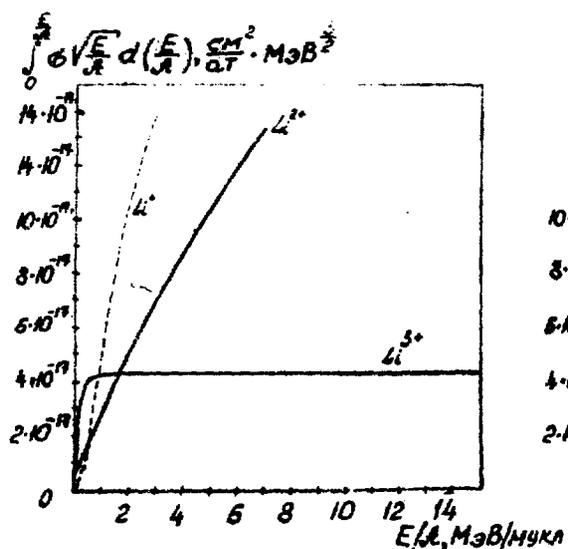


Рис. 5. Зависимость интеграла потерь из-за перезарядки для ионов лития от их энергии

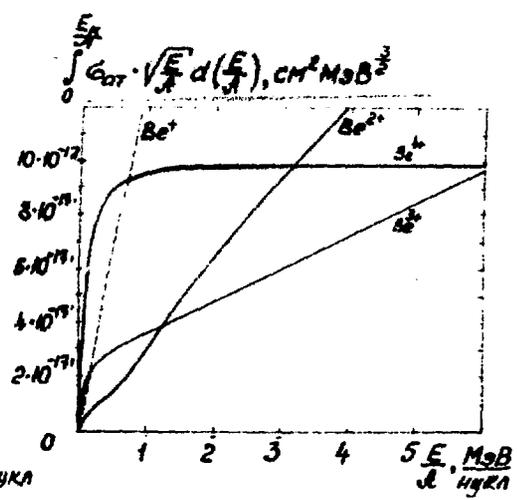


Рис. 6. Зависимость интеграла потерь из-за перезарядки для ионов бериллия от их энергии

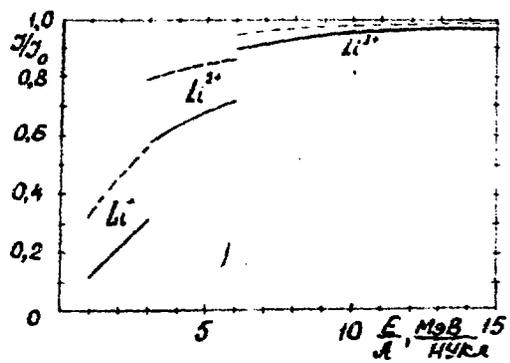


Рис. 7. Зависимость доли пучка ионов лития, не испытавших перезарядку при их ускорении в изохронном циклотроне ИАЭ, от конечной энергии: — для  $2 \cdot 10^{-5}$  торр, - - - - для  $10^{-5}$  торр

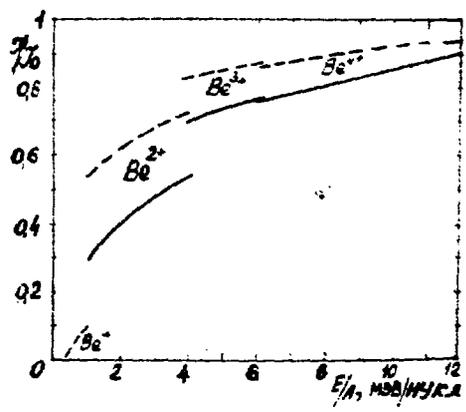


Рис. 8. Зависимость доли пучка ионов бериллия, не испытавших перезарядку при их ускорении в изохронном циклотроне ИАЭ, от конечной энергии: — для  $2 \cdot 10^{-5}$  торр, - - - - для  $10^{-5}$  торр

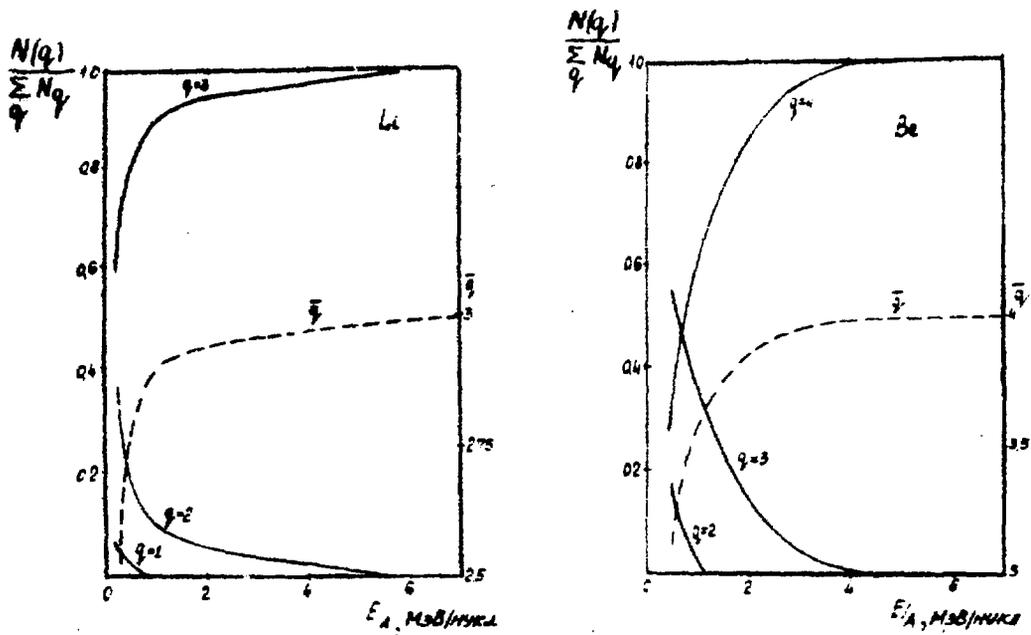


Рис. 9. Зарядовый спектр и средний заряд ионов лития, получающийся при перезарядке на твердых мишенях, в зависимости от энергии

Рис. 10. Зарядовый спектр и средний заряд ионов бериллия, получающийся при перезарядке на твердых мишенях, в зависимости от энергии

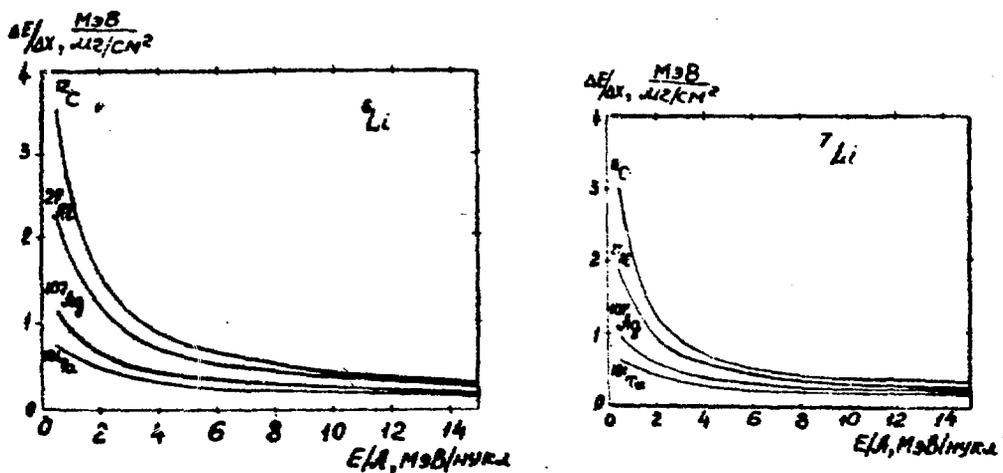


Рис. 11. Удельные потери энергии ионами  ${}^6\text{Li}$  в углеводе, алюминии, серебре и тантале в зависимости от энергии

Рис. 12. Удельные потери энергии ионами  ${}^7\text{Li}$  в углеводе, алюминии, серебре и тантале в зависимости от энергии

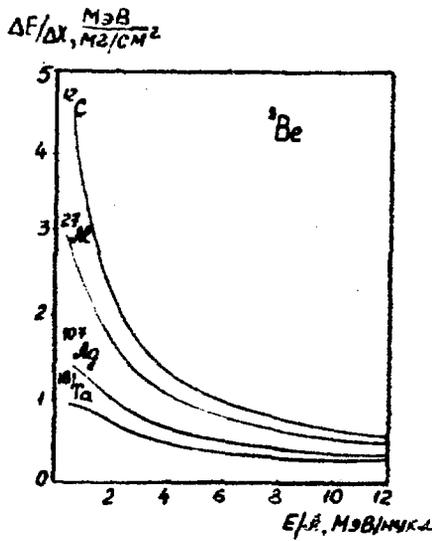


Рис. 13. Удельные потери энергии ионами  ${}^9\text{Be}$  в углеводе, алюминии, серебре и тантале в зависимости от энергии

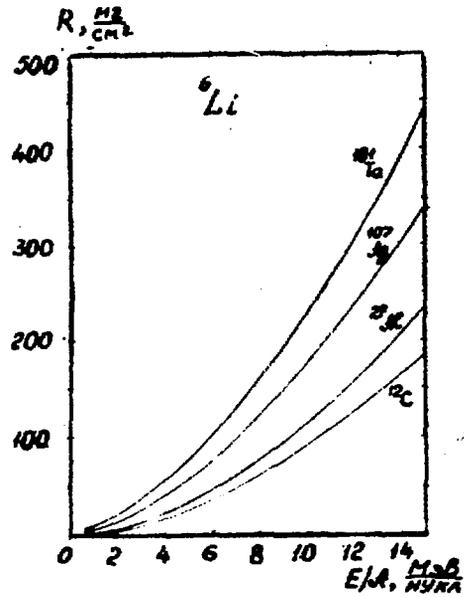


Рис. 14. Пробег ионов  ${}^6\text{Li}$  в углеводе, алюминии, серебре и тантале в зависимости от энергии

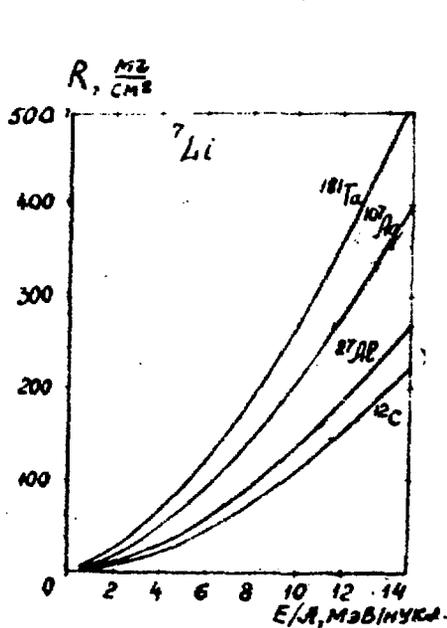


Рис. 15. Пробег ионов  ${}^7\text{Li}$  в углеводе, алюминии, серебре и тантале в зависимости от энергии

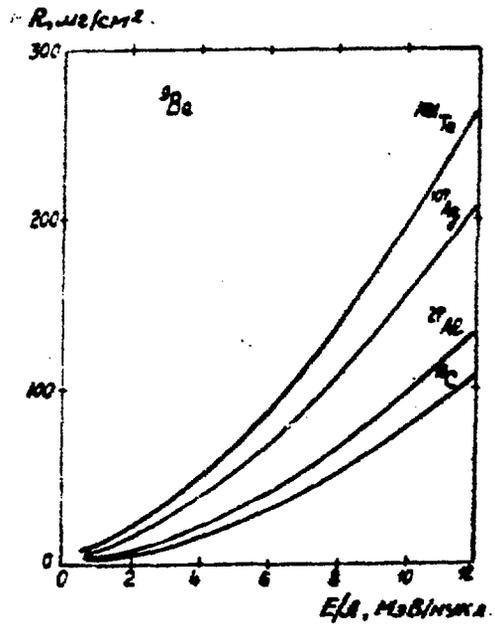


Рис. 16. Пробег ионов бериллия в углеводе, алюминии, серебре и тантале в зависимости от энергии

## Литература

1. Оглоблин А.А. Избранные вопросы структуры ядра, т. 2, с. 31. Дубна Д-9920, 1976.
2. Vasiljev P., Venikov N. e.a. - Nucl. Inst. and Meth., 1969, v. 71, p. 201.
3. Веников Н.И., Унежев В.Н., Чумаков Н.И. - ПТЭ, 1975, № 3, с. 24.
4. Николаев В.С. и др. - В сб.: Ускорители, Атомиздат, 1960, с. 90.
5. Теплова Я.А. и др. - ЖЭТФ, 1957, т. 32, с. 974.
6. Теплова Я.А. и др. - Изв. АН СССР, 1959, т. 23, с. 894.
7. Николаев В.С. и др. - ЖЭТФ, 1961, т. 40, с. 989.
8. Дмитриев И.С. и др. - ЖЭТФ, 1962, т. 42, с. 16.
9. Теплова Я.А. и др. - ЖЭТФ, 1962, т. 42, с. 44.
10. Davidov V. e.a. - Arkiv fur Fysik Band, 1967, v.36, N 33, p. 263.
11. Gough R., Clark D., Glasgow L. - IEEE Trans. Nucl. Sci., 1979, v. NS-26, N 2.
12. Sakurada Y. e.a. - IEEE Trans. Nucl. Sci., 1979, v. NS-26, N 2.
13. Pollock R. - IEEE Trans. Nucl. Sci., 1979, v. NS-26, N 2.
14. Haushahn G. e.a. - Proc. VII Intern. Conf. on Cyclotrons, Zürich, 1975, p. 376.
15. Venikov N., Latuskin S. e.a. - IEEE Trans. Nucl. Sci., 1979, v. NS-26, N 2.
16. Веников Н.И., Хорошавин Б.И., Чумаков Н.И. Препринт ИАЭ-1359. М., 1967.
17. Веников Н.И., Глухов Ю.А. и др. - "Ядерная физика", 1975, т. 22, с. 924.

18. Gough R., Mallory M. - IEEE Trans. Nucl. Sci., 1979, v. NS-26, N 2.
19. Васильев А.А. и др. - Труды РТИ, 1975, № 22, с. 200.
20. Сенашенко В.С. и др. - "Вестник МГУ. Физика, Астрономия", 1970, № 2, с. 1361.
21. Дмитриев И.С. и др. - ЖЭТФ, 1977, т. 73, с. 1684.
22. Николаев В.С. - УФН, 1965, т. 85, с. 679.
23. Wittkower A.B., Betz H.D. - Atomic. Data, 1973, v. 5, p. 113.
24. Northcliffe L.S., Schilling R.F. - Nuclear Data Tables, 1970, v. A7, p. 233.
25. APACHE, a Proposal ORNL, Oakridge, 1969.
26. Linchard J. e.a. - Kgl. Danske Videnskab. Selskab., Mat.-Fys. Medd., 1963, v. 33, p. 14.



Редактор Л. И. Кирюхина  
Технический редактор Н. И. Мазаева  
Корректор Н. Н. Черемных

Т-14464. 17. 08. 79. Формат 60x90/16. Уч.-изд. л. 1,10  
Тираж 131. Заказ 1449. Цена 11 коп. Индекс 3624. ИАЭ

II коп.

Индекс 3624