

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 α 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 β 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 другом остаточном газе, 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, $\text{см}^2/\text{ат}$; 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 (Li^{3+} и 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 Li^+ , Li^{2+} , Li^{3+} и 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 α 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

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

Результаты измерений K на циклотроне ИАЭ

Ион МэВ/нукл.	Относительная ошибка измерений, %					$(K \pm \delta K)$ изм. $\text{см}^2 / (\text{ат.МэВ})^{3/2}$	K расчет. $\text{см}^2 / (\text{ат.МэВ})^{3/2}$
	$\frac{\delta J_1 + \delta J_2}{J_1 + J_2}$ $e_n^{J_1/J_2}$	$\frac{\delta(P_2 - P_1)}{P_2 - P_1}$	$\frac{\delta U}{U}$	$\frac{\delta \overline{\cos \varphi}}{\overline{\cos \varphi}}$	$\frac{\delta K}{K}$		
${}^6\text{Li}^+$ 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 ~ 4 м) потери при вакууме $2 \cdot 10^{-5}$ торр и энергии ионов ~ 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}C , ^{27}Al , ^{107}Ag и ^{181}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 ^6Li и ^9Be 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/см²; 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; δE - стрегглинг; ΔE - 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.

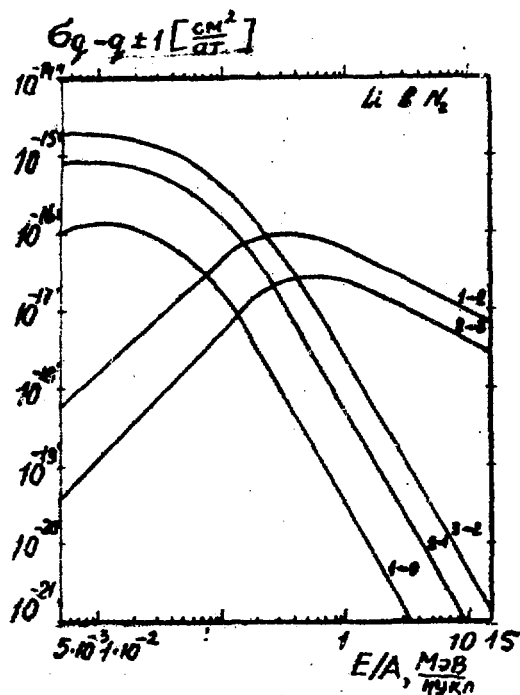


Рис. 1. Зависимость сечений захвата ($\sigma_{q \rightarrow q-1}$) и потери ($\sigma_{q \rightarrow q+1}$) электрона ионами лития в азоте от энергии

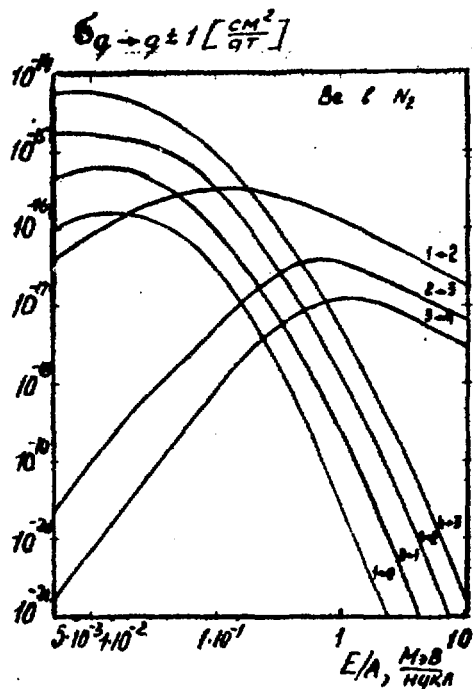


Рис. 2. Зависимость сечений захвата и потери электрона ионами бериллия в азоте от энергии

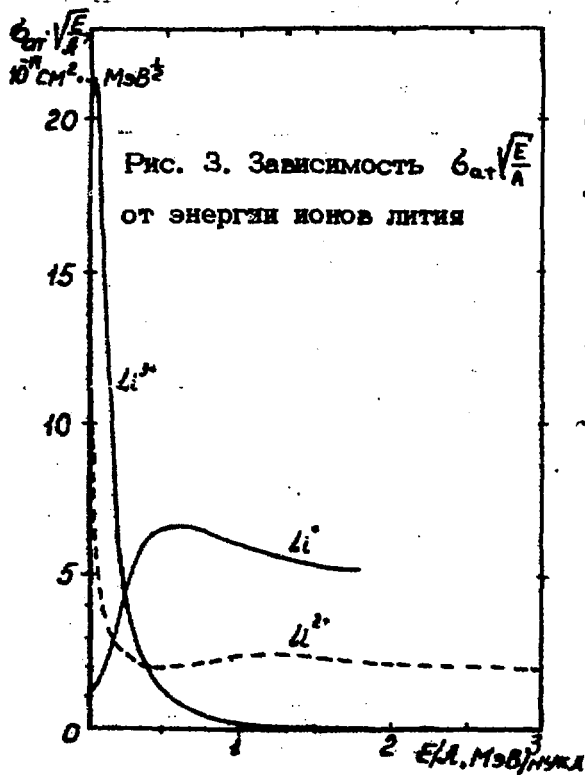


Рис. 3. Зависимость $\sigma_{ат} \sqrt{\frac{E}{A}}$ от энергии ионов лития

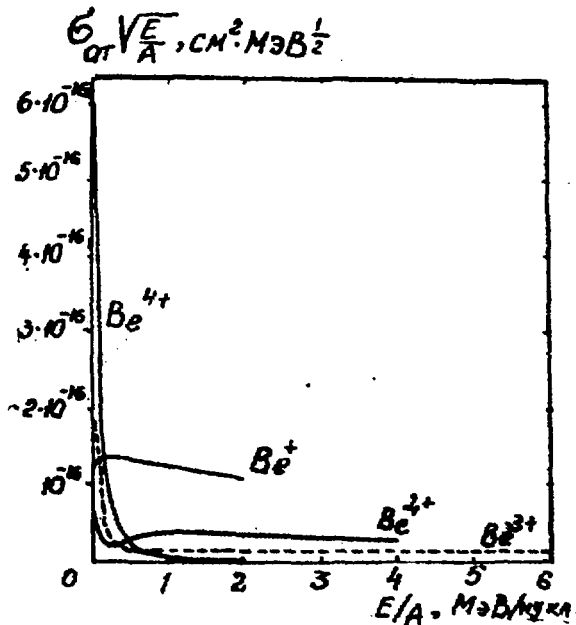


Рис. 4. Зависимость $\sigma_{ат} \sqrt{\frac{E}{A}}$ от энергии ионов бериллия

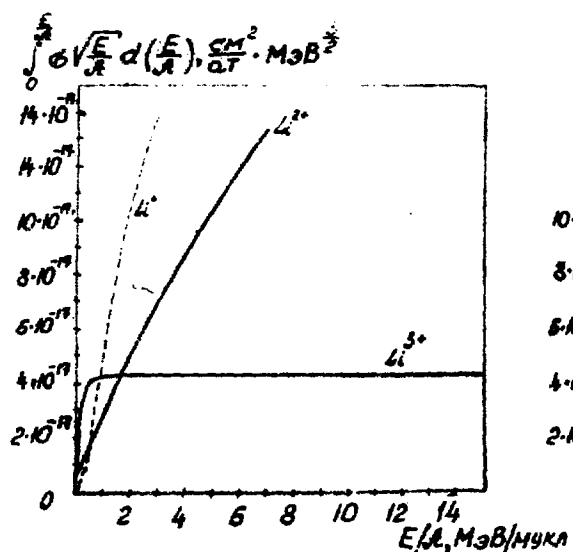


Рис. 5. Зависимость интеграла потерь из-за перезарядки для ионов лития от их энергии

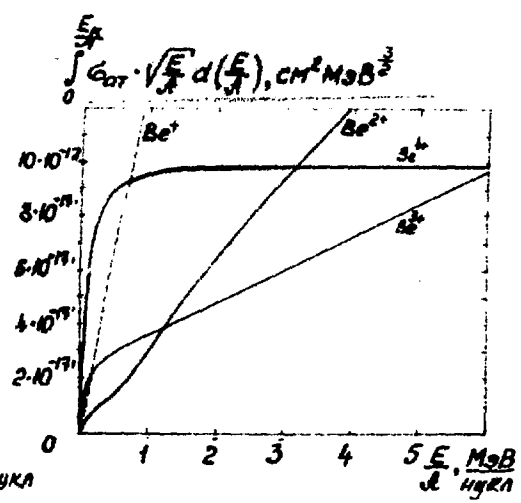


Рис. 6. Зависимость интеграла потерь из-за перезарядки для ионов бериллия от их энергии

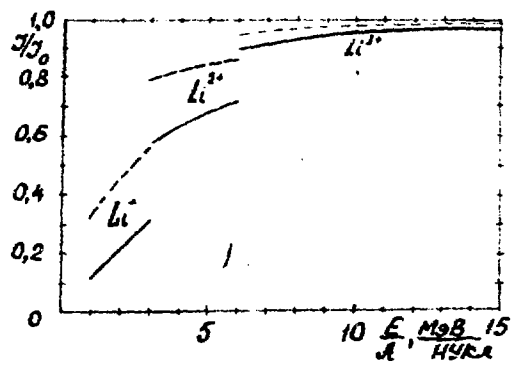


Рис. 7. Зависимость доли пучка ионов лития, не испытавших перезарядку при их ускорении в изохронном циклотроне ИАЭ, от конечной энергии: — для 2.10^{-5} торр, - - - - для 10^{-5} торр

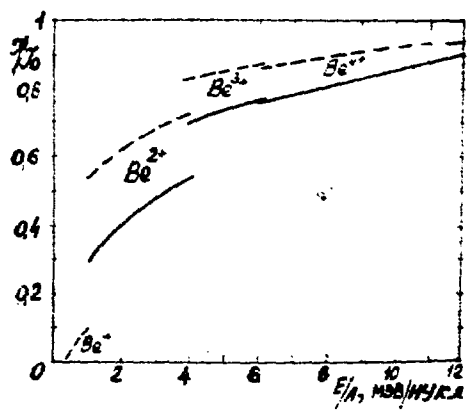


Рис. 8. Зависимость доли пучка ионов бериллия, не испытавших перезарядку при их ускорении в изохронном циклотроне ИАЭ, от конечной энергии: — для 2.10^{-5} торр, - - - - для 10^{-5} торр

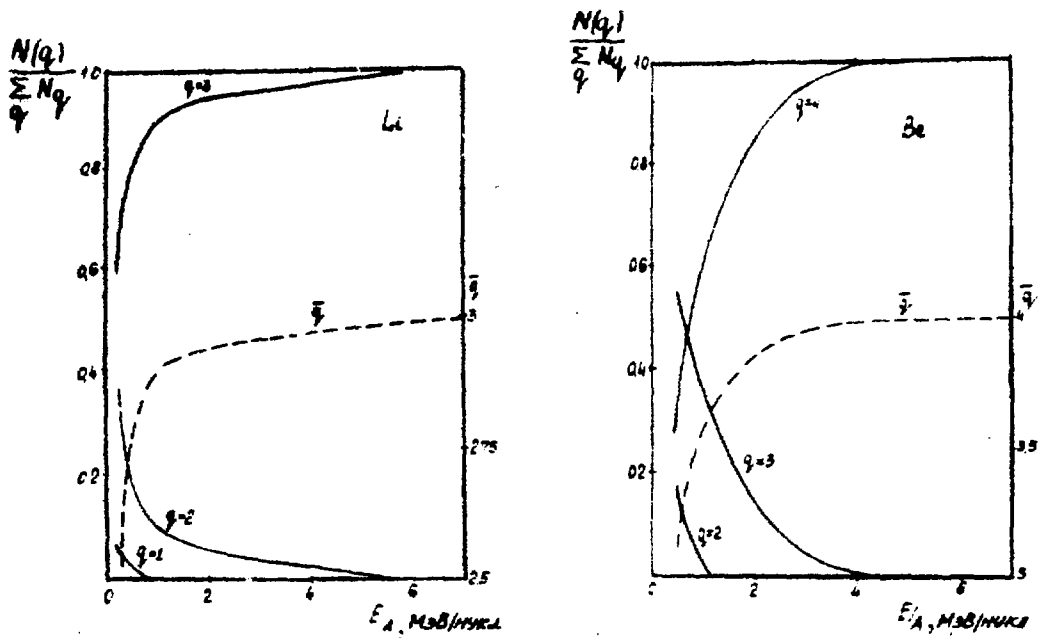


Рис. 9. Зарядовый спектр и средний заряд ионов лития, получающийся при перезарядке на твердых мишенях, в зависимости от энергии

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

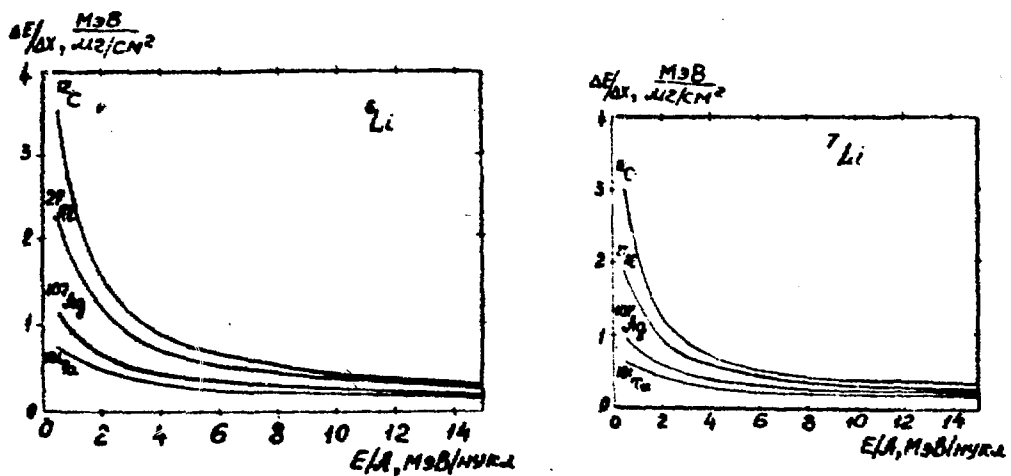


Рис. 11. Удельные потери энергии ионами ${}^6\text{Li}$ в углеводе, алюминии, серебре и тантале в зависимости от энергии

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

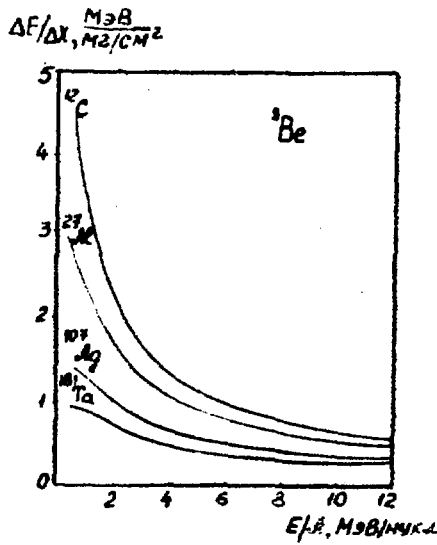


Рис. 13. Удельные потери энергии ионами ${}^9\text{Be}$ в угледе, алюминии, серебре и тантале в зависимости от энергии

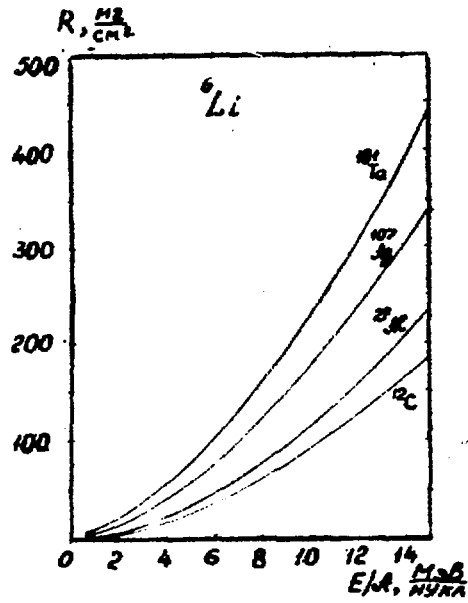


Рис. 14. Пробег ионов ${}^6\text{Li}$ в угледе, алюминии, серебре и тантале в зависимости от энергии

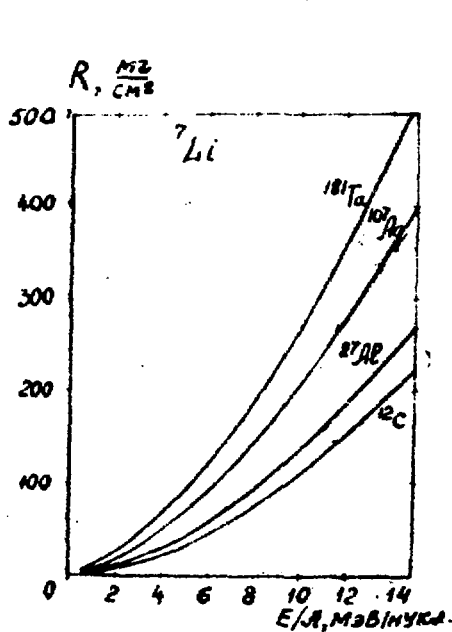


Рис. 15. Пробег ионов ${}^7\text{Li}$ в угледе, алюминии, серебре и тантале в зависимости от энергии

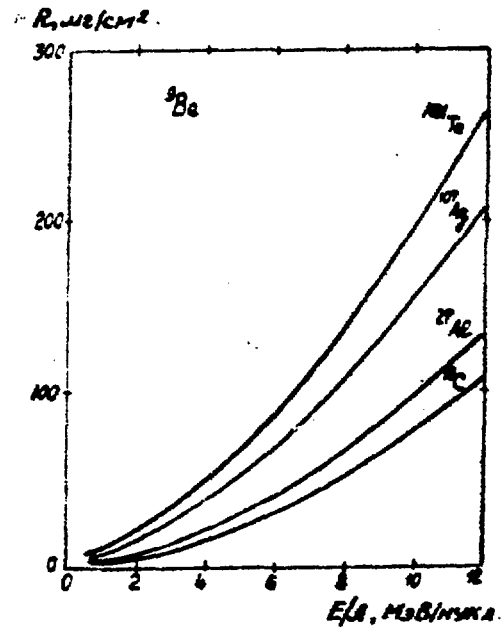


Рис. 16. Пробег ионов бериллия в угледе, алюминии, серебре и тантале в зависимости от энергии

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