

Я. А. ТЕПЛОВА, В. С. НИКОЛАЕВ, И. С. ДМИТРИЕВ
и Л. Н. ФАТЕЕВА

ПРОБЕГИ И УДЕЛЬНАЯ ИОНИЗАЦИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

В связи с недостаточным количеством экспериментального материала по вопросам торможения многозарядных ионов в веществе нами были продолжены измерения пробегов, удельной ионизации и равновесного распределения зарядов ионов в более широком диапазоне изменения заряда ядра иона Z [4]. В настоящей работе, кроме ионов с $Z \leq 10$, использовались ионы ^{23}Na , ^{25}Mg , ^{27}Al , ^{31}P , ^{37}Cl , ^{40}Ar , ^{39}K , ^{81}Br и ^{84}Kr . Часть полученных результатов приводится ниже.

Методика измерений

Источником ионов служил 72-сантиметровый циклотрон, позволявший получать ионы со скоростями от $2,5$ до $12 \cdot 10^8$ см сек $^{-1}$, что соответствует энергиям от 25 до 600 keV на нуклон. Сфокусированный пучок через цел-

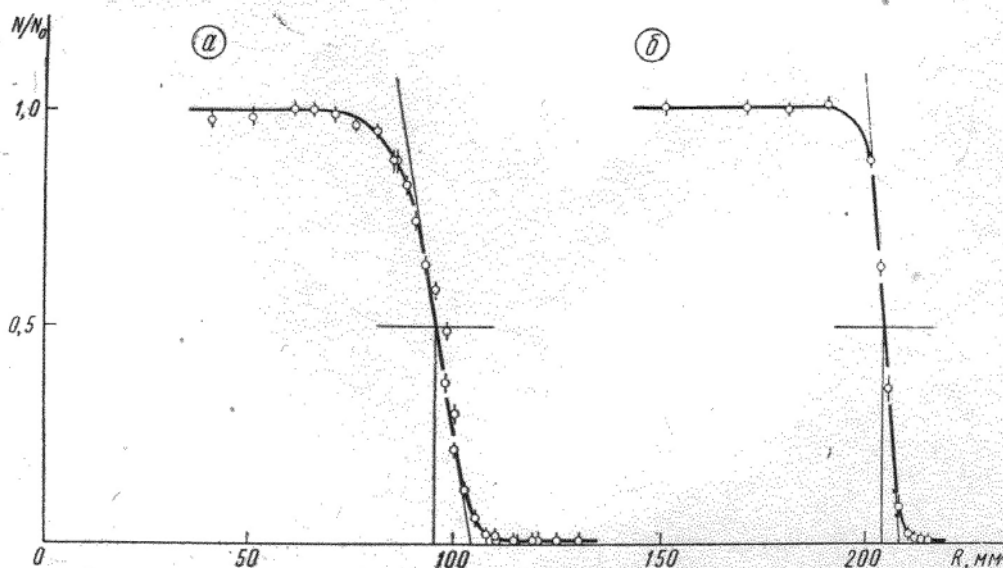


Рис. 1 Относительное количество частиц N/N_0 в зависимости от расстояния от входного окошка в камеру торможения: а — для ионов ^{31}P (давление воздуха в камере торможения $p = 26,8$ мм рт. ст., $t = 19^\circ$), б — для ионов He ($p = 141$ мм рт. ст., $t = 19^\circ$)

лулоидную пленку толщиной около $40 \mu\text{г см}^{-2}$ проходил в камеру торможения, наполненную воздухом до давления в несколько десятков миллиметров ртутного столба. Частицы регистрировались двумя пропорциональными счетчиками: через первый счетчик-монитор проходил весь пучок, второй счетчик передвигался вдоль траектории пучка в камере торможения и давал возможность измерять число частиц на разных расстояниях от входного окошка. На рис. 1 в качестве примера приведены типичные экспериментальные кривые. По таким кривым определялись величины

среднего и экстраполированного пробегов. Разница между ними соответствует величине разброса пробегов. Погрешности результатов измерений пробегов при скоростях $(4,0 \div 12) \cdot 10^8$ см сек⁻¹ колебались от 2 до 3%. Величина разброса пробегов изменялась для разных ионов от 3 до 9%.

По величине импульсов во втором пропорциональном счетчике измерялась удельная ионизация (в относительных единицах). По точке пересечения кривой удельной ионизации с осью абсцисс можно было, как это делалось в работе [1], определить пробег ионов. Полученный таким способом пробег, который будем называть максимальным, оказался на 3–5% больше экстраполированного.

Для изучения торможения ионов в твердых веществах на пути пучка помещались пленки известной толщины без подложки. Были использованы пленки из целлулоида, Al и Ag от 50 до 300 мкг см⁻² толщиной. Разница пробегов (с пленкой и без нее) давала возможность определить воздушный эквивалент пленки при данной скорости. Отношение эквивалентов для разных ионов находилось с точностью 7–10%, а абсолютное значение — с точностью 10–15%.

Равновесное распределение заряда ионов и средний заряд измерялись способом, описанным ранее [2, 3]. Скорость ионов определялась по величине поля фокусирующего магнита с точностью 1–2% [1].

Обсуждение результатов

Как показали измерения, для ионов с $Z > 10$, имеющих скорости меньше $5 \cdot 10^8$ см сек⁻¹, удельная ионизация в воздухе приблизительно (с точ-

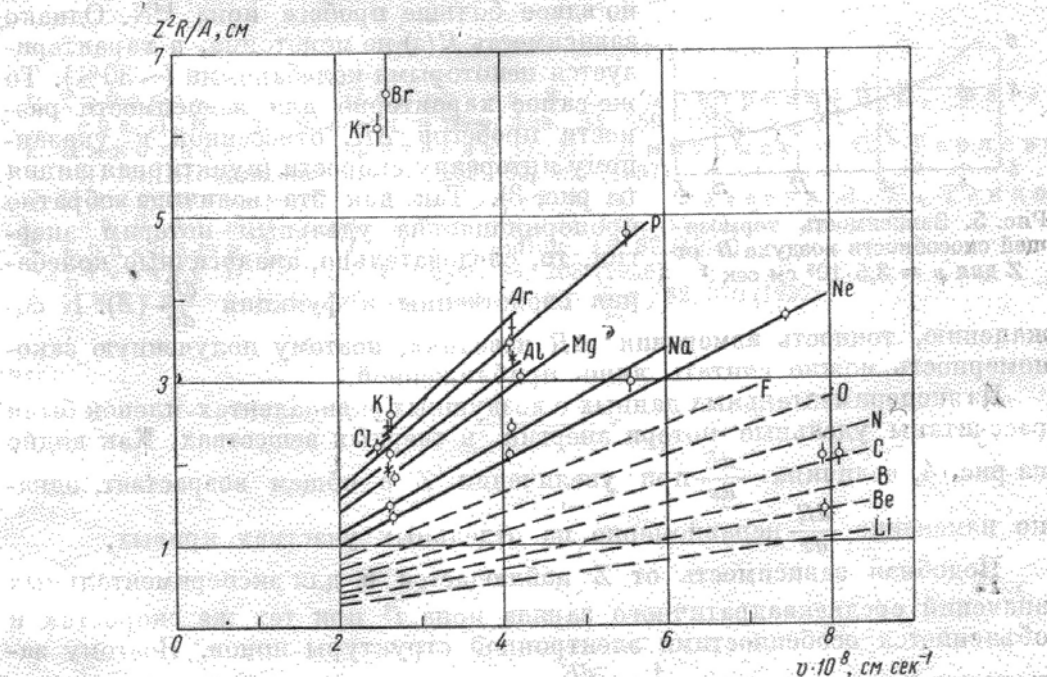


Рис. 2. Зависимость пробегов ионов в воздухе от скорости при $p = 760$ мм рт. ст., $t = 19^\circ$. Пунктирные линии — результаты работы [1]

ностью $\pm 10\%$) пропорциональна остаточному пробегу. Этого и следовало ожидать, так как, согласно [1], максимум удельной ионизации для более легких ионов (^7Li , ^{11}B , ^{14}N) достигается при скоростях $(6 \div 8) \times 10^8$ см сек⁻¹. В соответствии с этим пробег ионов при $v \leq 6 \cdot 10^8$ см сек⁻¹ должен быть примерно пропорционален скорости. Результаты измерения

максимального пробега ионов в воздухе приведены на рис. 2. По графику видно, что экспериментальные точки отклоняются от прямых, проведенных через начало координат, не более чем на 5%.

Представляет интерес рассмотреть зависимость пробегов различных ионов с одинаковыми начальными скоростями от Z (рис. 3). Оказывается,

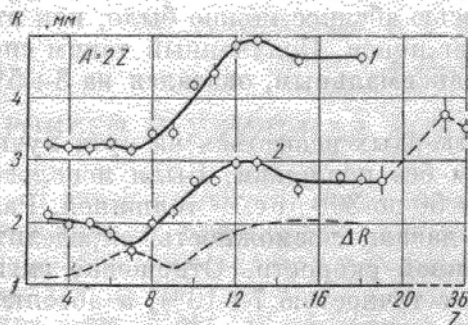


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость пробегов ионов в воздухе от заряда ядра иона Z при 760 мм рт. ст. и $t = 19^\circ$: 1 — $v = 4,1 \cdot 10^8$ см сек $^{-1}$, 2 — $v = 2,6 \cdot 10^8$ см сек $^{-1}$

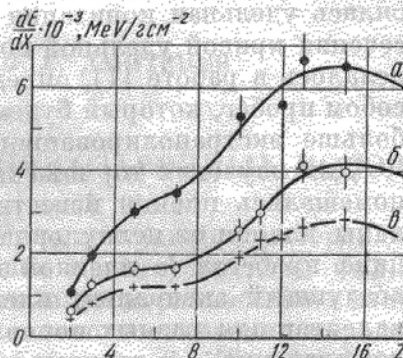
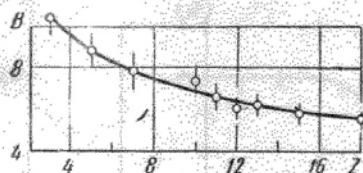


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость $\frac{dE}{dx}$ от Z в целлулоиде (а), Al (б) и Ag (в) для $v = 3,5 \cdot 10^8$ см сек $^{-1}$

что пробег ионов R при увеличении Z от 3 до 36 меняется относительно мало; например, при скорости $2,6 \cdot 10^8$ см сек $^{-1}$ пробег иона ^{84}Kr примерно вдвое больше пробега иона ^{14}N . Однако

Рис. 5. Зависимость тормозящей способности воздуха B от Z для $v = 3,5 \cdot 10^8$ см сек $^{-1}$

зависимость $R(z)$ не монотонна, а характеризуется некоторыми колебаниями ($\sim 30\%$). То же самое характерно для зависимости разности пробегов ΔR , отнесенной к указанному интервалу скорости (пунктирная линия на рис. 3). Так как эта величина обратно пропорциональна удельным потерям энергии, то, следовательно, аналогичные колебания свойственны и функции $\frac{dE}{dx}(Z)$. К со-

жалению, точность измерения ΔR невелика, поэтому полученную закономерность можно считать лишь приближенной.

Из экспериментальных данных о воздушных эквивалентах пленок были рассчитаны удельные потери энергии в твердых веществах. Как видно из рис. 4, величина $\frac{dE}{dx}$ при увеличении Z в общем возрастает, однако изменение $\frac{dE}{dx}$ неравномерно на отдельных участках кривых.

Подобная зависимость от Z наблюдается и для экспериментальных значений среднеквадратичного заряда иона $\bar{i}^2$ при тех же скоростях и объясняется особенностями электронной структуры ионов. Поэтому закономерно, что величина $\frac{1}{\bar{i}^2} \cdot \frac{dE}{dx}$ является монотонной функцией Z .

Из экспериментальных значений $\frac{dE}{dx}$ и $\bar{i}^2$ была вычислена тормозная способность веществ

$$B = \frac{dE}{dx} \left/ \frac{4\pi e^4 \bar{i}^2}{mv^2} N \right.,$$

где v — скорость иона, e , m — заряд и масса электрона, N — количество атомов в 1 см 3 вещества. Результаты представлены на рис. 5 и 6. Полу-

ченные значения тормозной способности воздуха для ионов с Z от 3 до 18 подтверждают зависимость B от Z , обнаруженную ранее для ионов с $Z \leq 10$ [1]. Уменьшение B при увеличении Z , как уже указывалось в [1], находится в соответствии с известной формулой Блоха для удельных потерь энергии.

Поскольку разница между средним зарядом ионов в газе и твердом веществе с ростом Z быстро увеличивается, зависимость B от Z в твердых веществах оказывается более резкой. Тормозная способность воздуха при $v = 3,5 \cdot 10^8$ см/сек для ионов ^{40}Ag почти в два раза ниже, чем для ионов ^7Li , а отличие тормозной способности твердых веществ для этих же ионов — в 4–5 раз.

В некоторых работах [4–6] при расчетах удельных потерь энергии многозарядных ионов пренебрегали зависимостью тормозной способности от Z . Из приведенных здесь данных следует, что такое пренебрежение может привести к значительным ошибкам.

Научно-исследовательский институт
ядерной физики
Московского гос. университета
им. М. В. Ломоносова

Цитированная литература

1. Теплова Я. А., Николаев В. С., Дмитриев И. С., Фатеева Л. Н., Ж. эксперим. и теор. физ., 34, 559 (1958).
2. Николаев В. С., Фатеева Л. Н., Дмитриев И. С., Теплова Я. А., Ж. эксперим. и теор. физ., 32, 965 (1957).
3. Николаев В. С., Дмитриев И. С., Фатеева Л. Н., Теплова Я. А., Ж. эксперим. и теор. физ., 33, 1325 (1957).
4. Lonchampt J. P., J. phys. et radium, 14, 89 (1953).
5. Livesey D. L., Can. J. Phys., 34, 203 (1956).
6. Дмитриев И. С., Ж. эксперим. и теор. физ., 32, 570 (1957).

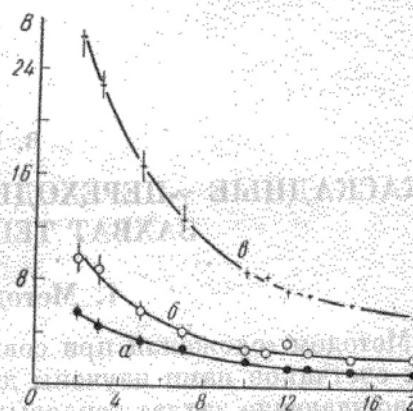


Рис. 6. Зависимость B от Z в целлюлозе (а), (Al) (б) и Ag (в) при $v = 3,5 \cdot 10^8$ см/сек.