

М. Д. БОРИСОВ, В. П. БРАЦЛОВСКИЙ и А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ
ПЕРВИЧНАЯ ИОНИЗАЦИЯ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ*

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 21 IX 1938)

Быстрые электроны при прохождении через среду тратят часть своей энергии на ионизацию атомов. Число актов ионизации на единицу пути, произведенных первичным электроном, называется первичной ионизацией.

Рассматривая взаимодействие быстрого электрона с атомами водорода с точки зрения волновой механики и учитывая релятивистские свойства электрона, Бете⁽¹⁾, а впоследствии Меллер⁽²⁾ и Вильямс⁽³⁾ нашли для первичной ионизации следующее выражение

$$I = \frac{2\pi n e^4}{m v^2 J} 0.285 \left[\lg \frac{42 m v^2}{J(1-\beta^2)} - \beta^2 \right], \quad (1)$$

где $\beta = v/c$.

Эта формула предсказывает, что первичная ионизация уменьшается с увеличением энергии электрона и, начиная с $1.5 \cdot 10^6$ eV, начинается медленное увеличение первичной ионизации, которая для энергии электронов порядка 10^9 eV достигает значения, на 70% больше минимального.

Можно уверенно утверждать, что общий вид зависимости первичной ионизации от энергии электрона остается для других веществ таким же, как это следует из формулы (1) для водорода, хотя абсолютная величина первичной ионизации для других веществ не может быть предсказана существующими теориями.

Экспериментальных работ по измерению первичной ионизации было сделано мало, и их результат недостаточно определен. Первичная ионизация обычно измеряется путем счета числа капель на фотографиях путей электронов в камере Вильсона. Полученное таким образом число должно быть несколько выше, чем истинная первичная ионизация, так как в это число кроме ионов, произведенных первичным электроном, входит некоторая часть ионов, произведенных вторичными электронами, выбитыми из атомов первичными электронами. В разных экспериментальных условиях количество сосчитанных вторичных ионов различно, и это очевидно является причиной значительного расхождения в величинах первичной ионизации, полученных разными авторами.

* Эта работа была доложена на Ученом совете Украинского физико-технического института 9/I 1937 г.

Первое определение порядка величины первичной ионизации путем счета капель на фотографиях путей электронов в камере Вильсона было сделано Вильсоном. Скорость электронов не измерялась, но оценивалась в величину большую, чем $2 \cdot 10^9$ см/сек. Порядок величины первичной ионизации в воздухе получился от 18 до 22 ионов/см. Терру и Вильямс⁽⁴⁾ поместили камеру в магнитное поле и измерили зависимость первичной ионизации от энергии электронов на 72 путях в кислороде и на 108 путях в водороде. В обоих веществах они нашли, что первичная ионизация с увеличением энергии электрона падает и затем достигает некоторого постоянного минимального значения. Для энергии в $1.6 \cdot 10^6$ eV (максимальная энергия в этих опытах) они нашли первичную ионизацию 22 иона/см в кислороде и для энергии $1.12 \cdot 10^6$ eV в водороде 5.1 иона/см. Скрамстед и Лауридж⁽⁵⁾, работая с электронами до $2 \cdot 10^6$ eV, нашли зависимость первичной ионизации в азоте от энергии электронов на 100 путях. Для энергии электронов в $1.5 \cdot 10^6$ eV они нашли 19.3 иона/см. Для энергий больше, чем $1.5 \cdot 10^6$ eV, возрастания первичной ионизации не было наблюде-
но. Наконец для космических электронов можно указать на работу Андерсона⁽⁶⁾, который нашел 31 ион/см на диффузных путях, и на работу Кунце⁽⁷⁾, который нашел 20 ионов/см на острых путях.

Таким образом из описанных опытов видно, что они не дают возможности прийти к определенным выводам в вопросе о зависимости первичной ионизации от скорости электронов. В настоящей статье описаны результаты измерений первичной ионизации на довольно значительном количестве фотографий путей быстрых электронов в азоте.

Автоматическая камера Вильсона диаметром в 15 см была наполнена азотом и смесью паров воды и алкоголя. На внутренней стенке камеры была укреплена платиновая фольга, которая освещалась γ -лучами от активного осадка тория. Маленькая ампулка с источником в 0.5 мСи была окружена со всех сторон 10 см свинца. В свинце был сделан канал, ведущий к камере. Против этого канала устанавливался источник во время фотографирования. При каждом расширении камеры снимались две фотографии под прямым углом при помощи двух аппаратов ФЭД. Камера освещалась двумя лампами 1 000 ватт 120 вольт, которые присоединялись к 220 вольтам перед расширением. Фотографии проектировались на подвижной экран при помощи той же системы, которой производилась и съемка. Кривизна путей измерялась при помощи совмещения с ними дуг различных радиусов, начерченных на целлюлоиде.

Из всех полученных путей мы выбрали: 1) имевшие длину не менее 5 см, 2) имевшие равномерную кривизну по всему пути и 3) имевшие распределение капелек, позволявшее счет. Полученные результаты были приведены к нормальным условиям и поправлены на возможное слияние капелек по формуле Кунце⁽⁷⁾:

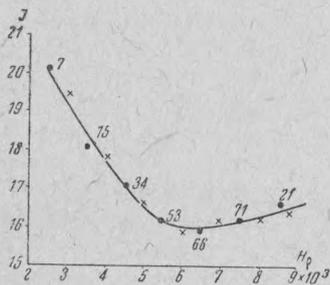
$$N_0 = N \frac{N\varepsilon}{1 - e^{-N\varepsilon}},$$

где N_0 —истинное число капелек на 1 см, N —наблюдаемое число капелек на 1 см, а ε —диаметр капельки. Диаметр капельки был около 0.4 мм. Нами было сделано около 1 000 пар фотографий, из которых мы отобрали и измерили 264 пути.

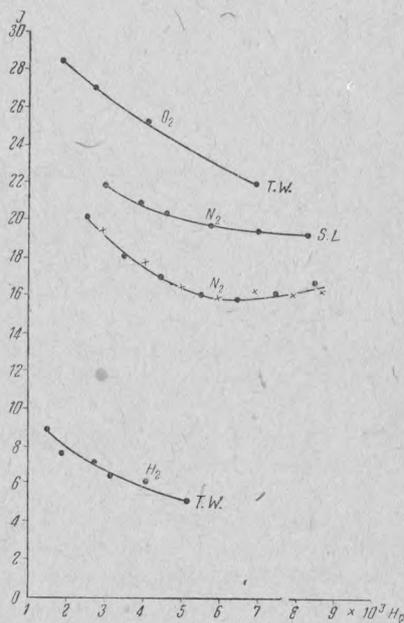
Для того чтобы построить кривую, мы подсчитали среднее значение первичной ионизации I , т. е. среднее значение числа капелек на 1 см пути для каждой группы электронов, энергии которых лежат в определенном интервале ΔH_r . Это среднее значение I было приписано электронам с энергией середины выбранного интервала. Результат этого построения показан на фиг. 1. Величина интервала ΔH_r была выбрана в 1 000 гаусс-см. Числа

над точками на фиг. 1 показывают число путей, использованных для получения данной точки. Точки, обозначенные крестиками, были получены при смещении всех интервалов на 500 гаусс-см вправо по сравнению с первым построением.

Из фиг. 1 видно, что наша кривая имеет минимум для энергии в $1.5 \cdot 10^6 \text{eV}$. Тот факт, что точки, отмеченные кружками, и точки, отмеченные крестиками, ложатся на ту же кривую, показывает, что форма кривой не зависит от выбора интервалов ΔH_p . Следует отметить, что благодаря наличию в источнике жесткой γ -линии $2.62 \cdot 10^6 \text{eV}$ большая часть путей попадает в наиболее интересную часть кривой.



Фиг. 1.

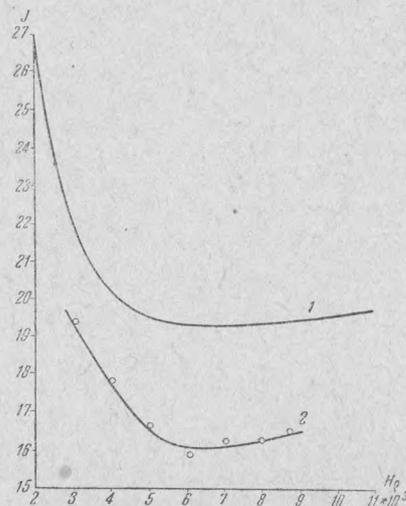


Фиг. 2.

На фиг. 2 показаны кривые, полученные разными авторами. Эти кривые показывают, что Терру и Вилльямс не могли заметить минимума, так как их источник не давал электронов с энергией выше $1.5 \cdot 10^6 \text{eV}$. Скрамстед и Лауридж получили одну точку с энергией выше $1.5 \cdot 10^6 \text{eV}$. Однако трудно установить, насколько надежна эта точка, так как авторы не указывают, из какого количества путей она получена. Фиг. 2 дает также представление об абсолютной величине первичной ионизации, полученной различными авторами. Наша кривая дает наименьшее значение для I . Вообще говоря, численное значение I может быть значительно искажено: 1) слиянием капель и 2) вторичными ионами. Если первое можно приблизительно учесть, то второе учесть невозможно. Поэтому мы постарались свести к минимуму ошибку от вторичных ионов и освещали γ -лучами платиновую фольгу только в конце расширения камеры, когда она была уже готова к образованию капель. Благодаря этому образование ионов и капель совершалось практически одновременно, и диффузией ионов можно было пренебречь. В отсутствие диффузии искажающее действие вторичных ионов очень мало, так как длина пробега вторичного электрона обычно меньше диаметра капельки.

На фиг. 3 изображена кривая, полученная нами, и кривая, полученная из формулы (1) при предположении, что $n=10n_0$, где n —число электронов в единице объема, а n_0 —число молекул в единице объема, и потенциал ионизации $J=16.6 \text{eV}$. Хотя и невозможно ожидать полного совпадения экспериментальной кривой с таким образом полученной теоретической,

однако сравнение этих кривых показывает, что они имеют одинаковый характер и что увеличение первичной ионизации для электронов с энергией большей, чем $1.5 \cdot 10^6$ eV, действительно наблюдается.



Фиг. 3.—1—теоретическая линия, 2—экспериментальная линия.

Таким образом мы должны сделать вывод, что квантовая теория первичной ионизации правильно описывает общий характер зависимости первичной ионизации от энергии электронов.

Украинский физико-технический институт.
Харьков.

Поступило
21 IX 1938.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Bethe, Ann. d. Phys., **5**, 325 (1930). ² Møller, Ann. d. Phys., **14**, 531 (1932).
³ Williams, Proc. Roy. Soc., **135**, 408 (1932); **139**, 463 (1933). ⁴ Terroux
 a. Williams, ibid., **126**, 286 (1930). ⁵ Skramstad a. Loughridge, Phys.
 Rev., **50**, 677 (1936). ⁶ Anderson, Phys. Rev., **44**, 406 (1933). ⁷ Kunze,
 ZS. f. Phys., **83**, 1 (1933).