

Рабочий

Академия наук СССР
Журнал «Приборы и техника эксперимента»
№ 3, 1957 г.

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ИОНИЗАЦИИ ПО МЕТОДУ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ
ПРОСВЕТА В КАМЕРЕ ВИЛЬСОНА И В ДИФФУЗИОННОЙ КАМЕРЕ

В. В. Бовин, П. А. Крупчицкий, И. И. Першин, Б. В. Чириков

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ИОНИЗАЦИИ ПО МЕТОДУ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ ПРОСВЕТА В КАМЕРЕ ВИЛЬСОНА И В ДИФФУЗИОННОЙ КАМЕРЕ

В. В. БОВИН, П. А. КРУПЧИЦКИЙ, И. И. ПЕРШИН, Б. В. ЧИРИКОВ

(Получено 14 октября 1956 г.)

Подробно описана методика измерения первичной ионизации путем определения средней длины просвета между изображениями капель следа частицы в камере Вильсона и в диффузионной камере. При измерениях первичной ионизации по методу средней длины просвета в условиях сильного перекрытия изображений капель в камере Вильсона, работающей в управляемом режиме, достигнута точность $\pm 10\%$ при длине измеренной части следа частицы около 10 см. В диффузионной камере при длине измеренной части следа частицы около 2 см получена точность измерения первичной ионизации $\pm 13\%$.

В монографиях, посвященных описанию метода измерений с помощью камеры Вильсона, иногда (например, [1]) встречаются утверждения, что при определении массы частиц по фотографиям следов появляются большие относительные ошибки из-за трудности одновременного измерения ионизации и импульса с необходимой степенью точности. Однако в последние годы появилось несколько работ [2, 3], в которых измерены с удовлетворительной точностью как импульсы частицы, так и производимая ею средняя («вероятная») ионизация.

Описываемые ниже опыты показывают, что при определенных условиях можно достичь хорошей точности в измерении первичной ионизации частиц в диффузионной камере, а также и в камере Вильсона, если обеспечено достаточно быстрое срабатывание ее в управляемом режиме. Измерения первичной ионизации имеют то преимущество, что они выполняются на недиффузных следах, в условиях благоприятных для точного измерения импульса частиц. Кроме того, при использовании метода средней длины просвета первичную ионизацию удастся измерять также и в случае сильного перекрытия изображений капель и тем самым расширить диапазон измеримых ионизаций, либо измерять ионизацию в камерах с повышенным давлением.

В работах [4, 5] была применена, по-видимому, аналогичная методика (подробное ее описание отсутствует). Авторы этих работ достигли, однако, небольшой точности в измерениях ионизации.

СООТНОШЕНИЯ, ИСПОЛЗУЕМЫЕ В МЕТОДЕ

При измерении первичной ионизации в камере Вильсона [6] обычно производится подсчет капель и отдельных сгустков капель, соответствующих актам первичной ионизации. При значительных ионизациях наступает сильное перекрытие изображений сгустков и отдельных капель, и первичная ионизация может быть измерена только косвенным путем. В качестве такого косвен-

ного приема очень удобен метод измерения средней длины просветов в следе частицы, используемый в фотоэмульсиях.

Связь между средней длиной просвета \bar{l} и ионизацией дается соотношением

$$I = 1/\bar{l}. \quad (1)$$

Статистическая ошибка в измеренном значении ионизации равна

$$\Delta I/I = 1/\sqrt{N}, \quad (2)$$

где N — полное число измеренных просветов. Соотношение (1) сохраняется при любых значениях фактора перекрытия изображений капель.

Основным достоинством метода средней длины просвета является то, что при поль-

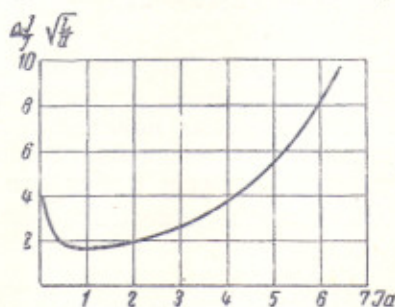


Рис. 1. График, дающий точность измерения первичной ионизации методом средней длины просвета, рассчитанной по формуле (1). l — длина измеренной части следа, a — средний диаметр изображения капли (ориентировочный). По оси абсцисс отложен безразмерный фактор перекрытия I_a

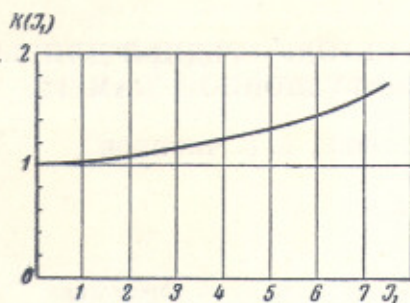


Рис. 2. График функции $K(I_1)$

зовании им нет необходимости точно измерять такую весьма неопределенную величину, как средний диаметр изображения капли. Метод средней длины просвета дает высокую степень точности вплоть до фактора перекрытия, равного двум (рис. 1 и пояснения к нему).

В (2) не учитывается ошибка Δl , вносимая при измерении самой длины просвета. При $(\Delta l/\bar{l})^2 \ll 1$, т. е. при достаточно больших \bar{l} , эта ошибка не влияет на величину $\Delta I/I$, определяемую формулой (2). При очень малых \bar{l} , когда $\Delta l \approx \bar{l}$, выгодно применять округление длины просветов до целого числа делений измерительной шкалы. Связь между средней длиной просвета, выраженной в округленном числе делений измерительной шкалы, и ионизацией перестает выражаться формулой (1) и дается более сложным соотношением:

$$\bar{l} = \exp(-I_1/2) [1 - \exp(-I_1)]^{-1}, \quad (3)$$

где I_1 — число актов первичной ионизации на длине, соответствующей одному делению шкалы. При измерении ионизации этим методом статистическая ошибка в определении первичной ионизации будет в K раз больше, чем в случае измерения \bar{l} без округления, где

$$K = K(I_1) = 2 [1 - \exp(-I_1)] I_1^{-1} [1 + \exp(-I_1)]^{-1} [\exp(I_1/2) + \exp(-I_1/2) - 1]^{1/2}; \quad (4)$$

Из графика функции $K(I_1)$ (рис. 2) видно, что ухудшение точности, получающееся при этом методе, незначительно, и, по-видимому, компенсируется уменьшением ошибок при измерении длины коротких просветов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ИОНИЗАЦИИ

Точные измерения первичной ионизации по методу средней длины просвета не могут быть выполнены при тех условиях фотографирования следов частиц, которые существуют в большинстве исследований с камерами Вильсона. Для того чтобы точность измерения первичной ионизации определялась лишь статистическими флуктуациями, необходимо устранить дополнительные источники ошибок, связанные как с плохим режимом работы камеры, так и с плохим качеством фотоснимков.

Перечислим основные требования, предъявляемые к фотографированию следов частиц и к режиму работы камеры, соблюдение которых необходимо для точного измерения ионизации.

1) Для достижения стандартных условий образования следов частиц необходимо поддержание 100% эффективности конденсации пара на ионах [7]. Для контроля эффективности конденсации в камере Вильсона в управляемом режиме использовалось разделение следов частиц на две колонки электрическим полем с напряженностью 30 в/см и производилось сравнение числа капель вдоль обеих колонок. Разделение колонок электрическим полем оказывается полезным и по другим причинам. Число капель в положительной колонке, по которой производится измерение ионизации, уменьшается примерно вдвое, что расширяет диапазон измеримых ионизаций. Устраняются из рассмотрения отрицательные ионы (в нашем случае — электроны), эффективность конденсации на которых почти всегда меньше 100% и может сильно флуктуировать. Нарушение структуры следа при разделении его на две колонки, отмеченное Блэккетом [8], в наших опытах не возникало, так как мы применяли аргон лишь с очень незначительными примесями электроотрицательных газов ($< 0,5\% O_2$). Поэтому происходило, собственно, не разделение следа на две колонки, а отделение электронов от неповижных положительных ионов (рис. 3).

В диффузионной камере осуществляются наиболее благоприятные условия для измерения первичной ионизации, так как она непрерывно сохраняет состояние пересыщения в рабочем слое. В наших опытах следы кос-

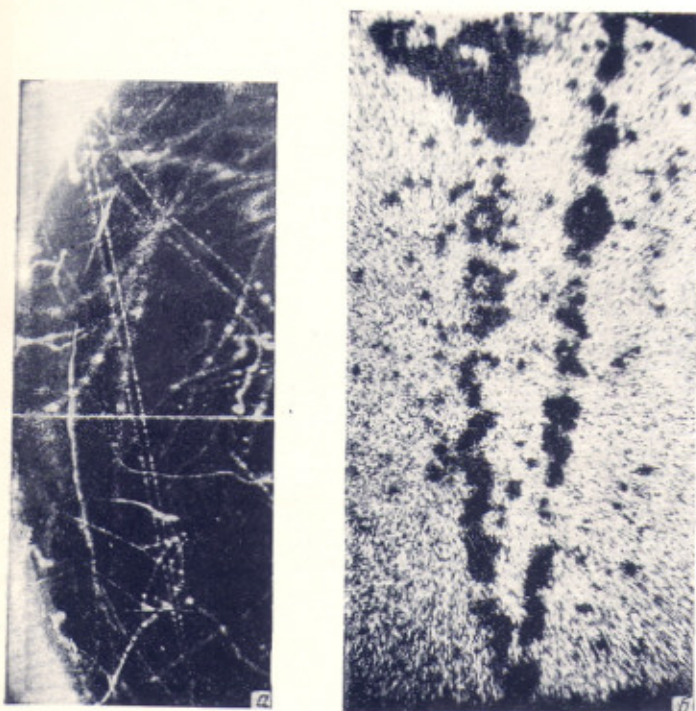


Рис. 3. Типичная фотография следа быстрой космической частицы в управляемом режиме в камере Вильсона (ϕ 320 мм), глубина 100 мм; расширение заканчивается через $7\div 8$ мсек после прохождения частицы). Видно разделение ионов на две колонки под действием приложенного электрического поля. Снимок сделан в условиях 100% эффективности конденсации. На поверхности свинца (черная полоса в нижней части фотографии) электрическое поле равно нулю. а) фотография в камере Вильсона, б) микрофотография нижнего участка следа. Правая колонка — положительная, левая — отрицательная

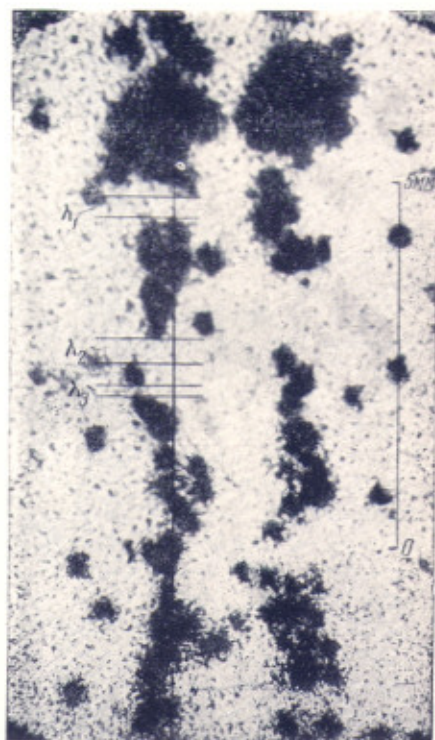


Рис. 4. Микрофотография участка следа быстрой космической частицы в камере Вильсона, показывающая, как производится измерение длин просветов

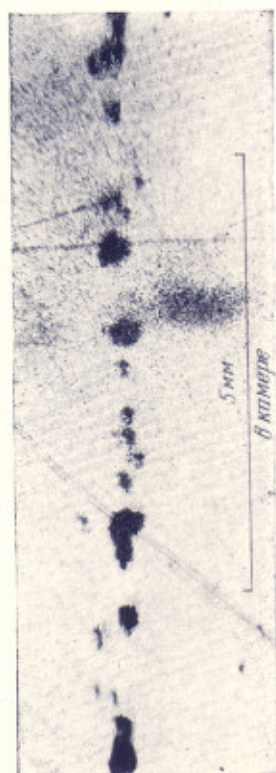


Рис. 6. Микрофотография участка следа быстрой космической частицы в диффузионной камере. Масштаб указан на фотографии. Диаметр камеры 18 см, высота чувствительного слоя 6 см



Рис. 7. Микрофотография следа быстрой космической частицы в диффузионной камере при большом увеличении

мических частиц имеют вид резко очерченных капель, расположенных строго по прямой линии (рис. 6 и 7). Для уверенности в наличии 100% эффективности конденсации при измерениях отбирались участки следов в центральной части чувствительного слоя камеры. Температуры дна и верхней крышки камеры стабилизировались.

2) При измерениях ионизации нужно использовать участки следов, не перекрывающиеся со значительным капельным фоном.

3) Одним из важнейших требований, возникающих при измерении первичной ионизации, является хорошее освещение следов, обеспечивающее получение четких изображений отдельных капель при отсутствии бликов. Для освещения камеры Вильсона применялись две импульсные лампы ИПК-600, фотографирование выполнялось под углом 45° к пучку света на высокочувствительную киноплёнку шириной 35 мм с уменьшением 1 : 10 при диафрагме $f : 20$. Диффузионная камера освещалась непрерывно ртутной лампой СВДШ-250, фотографирование производилось под углом 30° к пучку света. Затвор фотоаппарата управлялся схемой совпадений на счетчиках Гейгера — Мюллера.

4) Немаловажным является выбор пленки и проявителя. Были выбраны максимально контрастная пленка и проявитель. Это требование существенно, так как в случае неконтрастных снимков границы просветов становятся весьма неопределенными, и субъективные ошибки возрастают. Особенно нежелательно применение мелкозернистого проявителя.

5) При измерениях ионизации следует выбрать оптимальное увеличение микроскопа, на котором измеряются длины просветов на пленке. Слишком малое увеличение затрудняет измерение коротких просветов, а слишком большое снижает контрастность изображения, что приводит к росту субъективных ошибок. Авторы пользовались увеличением 100.

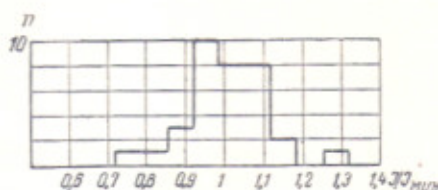


Рис. 5. Распределение измеренных значений ионизации в камере Вильсона

жения. В камере Вильсона измерение средней длины просвета производилось с округлением до целого числа делений окулярной шкалы микроскопа. Значения первичной ионизации вычислялись по формуле (3).

Для устранения влияния поперечной диффузии, которая всегда приводила бы к увеличению средней длины просвета, измерялась проекция полной длины просвета на направление следа, как это показано на рис. 4. Точность измерения первичной ионизации в наших опытах видна из гистограммы (рис. 5), на которой представлены результаты измерений для 34 следов жесткой компоненты космических лучей. Средняя длина измеренной части следов была равна 10 см. Средняя квадратичная ошибка, определенная из гистограммы, составляет 10%, тогда как расчет по формулам (2) и (4) приводит к величине 13%. Таким образом, видно, что ошибка в измерении ионизации связана, в основном, со статистическими флуктуациями. По нашим измерениям первичная ионизация в аргоне равна $32 \pm 0,5 \text{ см}^{-1}$ в пересчете на давление 760 мм рт. ст. и температуру 0° С. Если принять, что для жестких космических частиц усредненная ионизация составляет $1,12 I_{\text{мин}}$ [9], то в данном случае $I_{\text{мин}} = 28,6 \pm 0,5 \text{ см}^{-1}$, что хорошо согла-

ТАБЛИЦА 1

Давление		1,5 ат	2 ат	3 ат
Число следов, для которых выполнены измерения		27*	6	1
Среднее значение ионизации	Расчет	1	$1,33 \pm 0,02$	$2,00 \pm 0,03$
	Эксперимент	1	$1,28 \pm 0,05$	2,06

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРВИЧНОЙ ИОНИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Для измерений ионизации использовались одиночные следы космических частиц, прошедшие через 5-10 см свинца без размно-

ТАБЛИЦА 2

Измеренные значения первичной ионизации

Наблюдателя	Снимки							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	66*	58	66	64	47	90	72	102
2	44	26	43	54	57*	103	66	—
3	42	23	93	54	48	78	64	78
4	37	39	56	54	42	103	59	64
5	47	39	86	57	47	220*	59	163
Средняя квадратичная ошибка измерения первичной ионизации	24%	37%	30%	8%	11%	48%	9%	43%
Средняя квадратичная ошибка измерения ионизации после исключения случаев аномально больших отклонений (отмечены звездочкой)	10%	—	—	—	6%	13%	—	—

суется с результатами, опубликованными в [10] и с измерениями в диффузионной камере.

Для экспериментальной проверки зависимости (3) среднего округленного просвета от первичной ионизации производились измерения при различных давлениях в камере; результаты приведены в табл. 1.

Для выяснения роли субъективных ошибок был поставлен специальный опыт. Было отобрано 8 снимков следов частиц, различных по режиму работы камеры и по фотографическим показателям. Снимки A и E были сделаны при давлении внутри камеры, равном 1,5 ат, снимки D и G сделаны при давлении 2 ат. Все четыре снимка хорошего качества. Снимок B (давление 1,5 ат) плохого качества из-за мелкозернистого, не контрастного проявления, снимки C и H (давление 3 ат) плохого качества из-за сильного капельного фона и большой вуали. Снимок F имел удовлетворительное качество. Полученные 8 снимков обрабатывали 5 независимых наблюдателей, ранее таких измерений не производивших. Результаты опыта представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что при отбрасывании случаев с аномально большими отклонениями (например, исходя из критерия Шовене) для хороших следов (следы A, D, E, G) субъективные ошибки не превосходят 10%.

В диффузионной камере измерения ионизации производились по фотографиям, сделанным с трехкратным уменьшением. Из-за

отсутствия диффузии, малого давления в камере (атмосферного) и незначительного уменьшения, использованного при фотографировании, перекрытие изображений капель было незначительным (рис. 6 и 7). Первичная ионизация вычислялась по формуле (1). Первичная ионизация жесткой компоненты космического излучения была измерена в трех газах. Полученные значения ионизации, приведенные к нормальным условиям и исправленные на содержание паров спирта, даются в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3

Газ	Число следов	Средняя длина следа, мм	Первичная ионизация попов/см	Средняя квадратичная ошибка для одиночного измерения
Воздух	13	20	$21 \pm 1,5$	12%
Аргон	16	20	30 ± 2	11%
Углекислый газ	8	16	$28 \pm 2,5$	14%

Ошибки, возникающие в усредненном значении — первичной ионизации, относительно велики из-за того, что при пересчете измеренных значений первичной ионизации к нормальным условиям необходимо учитывать различие температуры чувствительного слоя по высоте камеры, достигающее 10°C .

Полученные результаты хорошо согласуются со значениями, полученными Кунце

[11], Данфортом и Рамзаем [12] для воздуха и Козинсом [13] для аргона. Величина первичной ионизации, вычисленная по Хазену [14], в углекислом газе равна 30 ионам/см, что хорошо согласуется с результатами, полученными в данной работе.

Приведенные в табл. 3 результаты измерений первичной ионизации являются усредненными значениями первичной ионизации по спектру жесткой компоненты космических лучей. Минимальные значения первичной ионизации жесткой компоненты на 12% меньше этих средних значений [9]. Измеренное значение первичной ионизации для аргона, пересчитанное на минимальную ионизацию, совпадает в пределах ошибок эксперимента со значением, полученным Мак-Кларом [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Вильсон. Камера Вильсона, ИИЛ, 1954.
2. E. W. Cowan. Phys. Rev., 1954, 94, 161.
3. W. B. Fretter, E. W. Frieser. Rev. Sci. Instr., 1955, 26, 703.
4. L. Leprince-Ringuet. J. de Phys., 1946, 7, 69.
5. C. Butler, G. Rochester. Proc. Phys. Soc., 1950, 63A, 145.
6. H. K. Skramstad, D. H. Loughridge. Phys. Rev., 1936, 50, 677.
7. W. E. Hazen. Phys. Rev., 1944, 65, 259.
8. P. M. S. Blackett. Nuovo. Cim., 1954, 11, Suppl. № 2, 361.
9. W. E. Hazen. Phys. Rev., 1945, 67, 269.
10. G. W. McClure. Phys. Rev., 1953, 90, 796.
11. P. Kunze. ZS Phys., 1933, 83, 1.
12. W. E. Danforth, W. E. Ramsey. Phys. Rev., 1936, 49, 854.
13. M. Cosyns. Nature, 1936, 138, 284.
14. W. E. Hazen. Phys. Rev., 1943, 63, 107.

Дополнения и замечания.

1. Продольная дисперсия вычислена относительно ошибки: $\Delta g/g = (\sigma^2/2)(g''/g)$, где σ^2 - средний квадрат шума дисперсии. B не релактив. сигнал $g \sim R^{-1/2}$ (R -эф. пробег) и т.е. предельно мало $\Delta g/g \approx 3/8 (\sigma/R)^2$.