

000201558

Препринт ЕФИ-928(79)-86.

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

А.Т.МАРГАРЯН

**ФЛЮКТУАЦИИ И ВЕРОЯТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ
ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ТЯЖЕЛЫХ
ИОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В ТОНКИХ СЛОЯХ
ГАЗА**

ЦНИИатоминформ

ЕРЕВАН-1986

Ա.Յ.ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ

**ՄԵԵ ԷՆԵՐԳԻԱՆԵՐՈՎ ԾԱՆՐ ԻՈՆՆԵՐԻ ԻՈՆԻԶԱՑԻՈՆ
ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ՖԼՈԿՍՈՒՍԻՆՆԵՐԸ ԵՎ ՀԱՎԱՆԱԿԱՆ
ԱՐԺԵՔՆԵՐԸ ԳԱՋԻ ՆԵՂ ՇԵՐՏԵՐՈՒՄ**

Քննարկվում է մեծ էներգիաներով ծանր իոնների իոնիզացիոն կորուստների ֆլուկտուացիայի և համառակն արժեքների չափված արդյունքների տեսութայունից շեղման պատճառները: Բերվում է ${}^3\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{40}\text{Ar}$, և ${}^{56}\text{Fe}$ իոնների էներգիայի կորուստների ֆլուկտուացիաների և համառակն արժեքների հաշվարկը (Ar (93%) + CH_4 (7%)) զազի խառնուրդում, կատարված Մոնտե Կառլո եղանակով, որտեղ հաշվի է առնված նաև էլեկտրոնների տեղափոխությունը փոքր իրական պայմաններին համապատասխան: Հաշվարկի արդյունքները փոքրի տվյալների հետ զտնվում են համաձայնության մեջ $\lesssim 3$ ռշտուճյալով:

Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտ

Երևան 1986

© **Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИИнформ) 1985г.**

Preprint ~~EDM~~-928(79)-86

A.T. MARGARYAN

FLUCTUATIONS AND PROBABLE VALUES OF IONIZATION ENERGY
LOSSES FOR HIGH-ENERGY HEAVY IONS IN THIN GAS LAYERS

The reasons of discrepancy between theory and results of measurement of ionization fluctuations and values of probable ionization for high-energy heavy ions in thin gas layers are analyzed. The Monte-Carlo calculations are presented with account of electron transfer under real experimental conditions, fluctuations and probable values of ionization energy losses in the gas mixture (Ar (93%) + CCl₄ (7%)) by ³He, ¹²C, ²⁰Ne, ⁴⁰Ar and ⁵⁶Fe ions. The calculation results agree with the experimental data to the accuracy of $\lesssim 3\%$.

Yerevan Physics Institute.

Yerevan 1986

УДК 539.1.074.23

А.Т.МАРГАРЯН

ФЛУКТУАЦИИ И ВЕРОЯТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ИОНИЗАЦИОННЫХ
ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
В ТОНКИХ СЛОЯХ ГАЗА

Анализируются причины расхождения от теории результатов измерений флуктуаций ионизаций и значений вероятной ионизации тяжелых ионов высоких энергий в тонких слоях газа. Приведены расчеты методом Монте-Карло, с учетом переноса электронов в реальных условиях эксперимента, флуктуаций и вероятных значений ионизационных потерь энергии в смеси газа ($\text{Ar}(93\%) + \text{CH}_4(7\%)$) ионами ^3He , ^{12}C , ^{20}Ne , ^{40}Ar и ^{56}Fe . Результаты расчета согласуются с экспериментальными данными с точностью $\leq 3\%$.

Ереванский физический институт

Ереван 1986

Хорошо известно, что когда средние ионизационные потери при прохождении заряженных частиц через поглотители конечных размеров больше максимально переданной энергии в элементарном акте столкновения, ионизационные потери подчиняются гауссовскому распределению [1], в обратном случае возникает хвост в распределениях в сторону больших энергетических потерь. В этом случае для поглотителей достаточно больших толщин энергетические потери подчиняются распределению Ландау-Вавилова [2,3]. Наблюдаемые распределения энергетических потерь однозарядных релятивистских частиц в тонких слоях газа [4] отклоняются от распределения Ландау и хорошо согласуются с теоретическими распределениями, основанными на моделировании ионизации и возбуждения методом Монте-Карло [5-7].

В случае прохождения тяжелых ионов высоких энергий через тонкие слои газа выполняются условия, при которых ионизационные потери подчиняются распределению Ландау-Вавилова. Однако в этом случае некоторая доля энергии теряется по причине вылета δ -электронов из рабочей области поглотителя. Влияние этого эффекта на распределение Ландау-Вавилова было получено в работах [8,9] при следующих предположениях:

I) электроны с энергией меньше $E_{гр}$ полностью поглощаются в поглотителе;

2) из рабочей области вылетают электроны с энергией больше $E_{гр}$;

3) каждый вылетающий из рабочей области электрон оставляет в поглотителе энергию, равную по величине $E_{гр}$.

Значение $E_{гр}$ выбирается для каждого конкретного случая экспериментально.

Измерение [10, 11] энергетических потерь высокоэнергетических тяжелых ионов (^3He , ^{12}C , ^{20}Ne , ^{40}Ar и ^{56}Fe) при прохождении через газ толщиной $1,6\text{мг}/\text{см}^2$ ($\text{Ar}(93\%) + \text{CH}_4(7\%)$) показало, что экспериментальные распределения получаются уже распределения Ландау-Вавилова и по форме приближаются к гауссовскому распределению, а значения наиболее вероятных потерь получаются меньше теоретических, предсказанных Стернхеймером и Пейерлсом [12]. Это заставило авторов работы [10] усомниться в правильности учета эффекта плотности в этих условиях.

Расчеты Бадвара и Адамса и др. [8, 9] показывают, что учет вылета электронов приближает распределения Ландау-Вавилова к гауссовскому и от 3% до 14% отклоняются от наблюдаемых [10, 11] распределений. Следует отметить, что предположения (1-3), которые лежат в основе расчета Бадвара и Адамса и др., носят искусственный характер, так как в действительности: во-первых, рабочую область поглотителя покидают электроны разных энергий и, во-вторых, покидающие рабочую область δ -электроны в нем выделяют разные энергии.

Для точного решения влияния вылета δ -электронов на распределение ионизационных потерь необходимо проследить за всеми образованными δ -электронами до тех пор, пока они не поки-

нут рабочую область поглотителя, и определить энергию, которую они оставляют в ней. В этой работе эта задача решена моделированием методом Монте-Карло энергетических потерь тяжелых ионов и переноса δ -электронов в веществе. Энергетические потери вычислялись с помощью нашей программы [5]. Единственное отличие от предыдущей программы [5] заключалось в том, что для сечения ионизации и распределения энергии при ионизации использовалось выражение $\text{const}/E^2(1-\beta^2E/E_{\text{max}})$ вместо выражения const/E^2 , где E - энергия образованных δ -электронов, E_{max} - его максимально возможное значение $\beta = v/c$ - скорость иона. Угол, который получает δ -электрон, определяется из выражения $\cos^2\theta = E/E_{\text{max}}$. Перенос электронов в веществе осуществлялся по схеме "укрепленных" соударений [12], сущность которых заключается в разбивке на отрезки пробега. После каждого отрезка меняются энергия и угол δ -электрона. Шаг разбивки в газе $\Delta S \sim E/P$, где E - энергия электронов в мегаэлектронвольтах, P - давление газа в атмосферах при $E=0,01$ МэВ, $P=1$ атм, ΔS принимается равной 0,01 см. Для энергетических потерь используется формула Бете-Блоха. Среднее число упругих столкновений δ -электронов в аргоне на отрезке ΔS составляет величину ~ 4 . Угол многократного рассеяния разыгрывается из распределения Мольера, уточненного для случаев прохождения через тонкие слои вещества [13]. Электроны прослеживаются в трехмерном пространстве с учетом точной геометрии поглотителя до поглощения или вылета из рабочей области газа. Они считаются поглощенными, когда энергия становится меньше 500 эВ. При вылете из рабочей области газа

определяется энергия, которую электроны оставляют в ней. Учитывается также перенос электронов в стенках и обратное отражение в газовый объем.

С помощью этой программы были вычислены ионизационные потери тяжелых ионов (^3He , ^{12}C , ^{20}Ne , ^{40}Ar , ^{56}Fe) в газе (Ar (93%) + CH_4 (7%)) при условиях, соответствующих экспериментам [IО, II] .

Геометрия установки схематически показана на рис. I. Стенки детектора сделаны из бронзы. Рабочая область газа составляет длину 10 см (I зона). В обоих концах рабочей зоны существуют нерабочие области газа длиной 2,5 см (II зона).

δ - электроны с I-й могут проникать во II-ю зону и наоборот, при этом считается, что энергия, уносимая из I-й зоны во II-ю, равна энергии, приносимой из II-й в I-ю. Поэтому в расчетах вылет δ - электронов из I-й зоны во II-ю не считается потерей δ - электронов. Моделирование аналогичным образом переноса электронов в стенках детектора (III зона) и учет обратно рассеянных электронов существенно не влияет на конечный результат расчетов, поэтому электроны, достигшие металлических частей детектора, считаются потерянными. Программа, написанная на языке ФОРТРАН, позволяет одновременно вычислить ионизационные потери без ограничений (распределения Ландау-Вавилова) с граничной энергией (условие, эквивалентное случаю Бадвара и Адамса и др.) и наконец, с учетом переноса δ - электронов. Вычисления проводились на ЭВМ БЭСМ-6.

На рис. 2-4 приведены результаты расчетов полученных энер-

гетических потерь при прохождении ядер углерода, неона и аргона с энергиями 450, 670 и 1800 МэВ/нуклон соответственно через детектор (рис.1), наполненный смесью газа (93% Ar + 7% CH₄) толщиной 1,6 мг/см² при давлении 0,1 атм. Траектория этих частиц выбиралась параллельной оси Z с координатами входа в детектор, равными X=0, Y=1,5 и Z = 0 см.

Для сравнения с экспериментом и во избежание трудностей, связанных с абсолютной нормировкой, в таблице значения полных ширин на полувысоте и наиболее вероятных потерь, полученные в результате расчетов, приведены совместно с экспериментальными значениями этих величин [10,11]. Значения расчетных величин оценены визуально, что приводит к ошибкам, не превышающим нескольких процентов [7]. Приведенные ошибки соответствуют половине энергетических шагов полученных гистограмм. Как видно, полученные нами значения полных ширин на полувысоте и наиболее вероятные потери с точностью $\approx 3\%$ находятся в согласии с соответствующими экспериментальными значениями. Распределения Ландау-Вавилова для всех ионов и распределения Бадвара и Адамса и др. для ионов He, ¹²C и ²⁰Ne, полученные методом Монте-Карло, находятся в хорошем согласии с аналогичными распределениями, приведенными в [10,11], а распределения Бадвара и Адамса и др. для ионов ⁴⁰Ar и ⁵⁶Fe получаются на (10-20)% шире. Таким образом, вычисление ионизационных потерь методом Монте-Карло [5] и детальный учет переноса δ - электронов в ограниченном поглотителе хорошо объясняют наблюдаемые спектры и их можно применять для проведения спектрометрических анализов, в частности на основе кривой Брегга [15] в детекторах осколков деления и ядер отдачи (см. напр. [16]).

Т А Б Л И Ц А

Значения наиболее вероятных энергетических потерь и полных ширин на полувысоте. Значения в колонках (теоретические и экспериментальные) взяты из [10, 11] и соответствуют распределению Бадвара и Адамса и др. и эксперименту, Монте-Карло - наши расчеты

Частица	Энергия (МэВ/нуклон)	Давление газа (атмосф.)	Толщина газа (мг/см ²)	Наиболее вероятные потери (кэВ)		Полная ширина на полувысоте (%)		
				теор.	экспер.	теор.	экспер.	
³ He	40,0	0,10	1,6	51,4±1,3	55,0±1,25	41,7	40,8±1,9	40,9±1,3
³ He	40,0	0,21	3,36	123,2±1,8	122,5±1,25	33,27	33,06±0,66	33,0±1,0
³ He	40,0	0,49	7,84	291,0±2,9	295,0±2,5	25,39	26,5±0,54	23,7±0,8
¹² C	450,0	0,10	1,598	87,1±2,8	87,5±2,5	35,4	30,5±1,1	31,0±1,4
²⁰ Ne	670,0	0,10	1,584	198,1±4,0	210,0±2,5	22,5	19,8±0,33	19,5±1,2
⁴⁰ Ca	1800,0	0,10	1,617	577,0±11,0	580,0±5,0	13,4	15,29±0,36	14,0±0,9
⁵⁶ Fe	1870,0	0,10	1,617	1254,0±16,0	1215,0±7,5	8,37	9,50±0,11	9,3±0,9

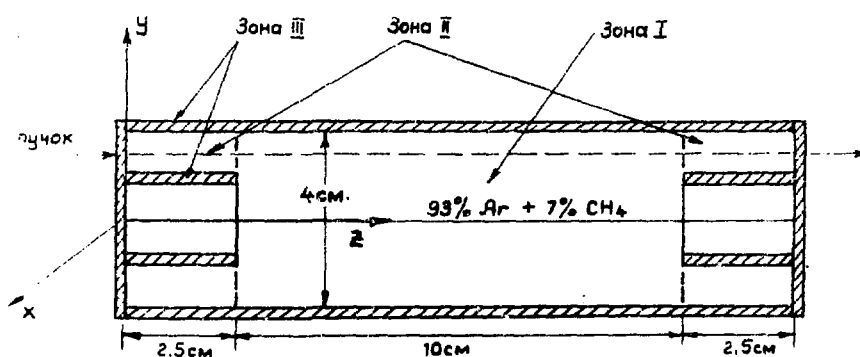


Рис. I. Общая схема пропорциональной камеры.

Зона I - рабочая, зона II - нерабочая, зона III - металлическая часть камеры.

Пучок входит в камеру в точке с координатами $X=0$, $Y=1,5$, $Z=0$ см и проходит параллельно оси Z

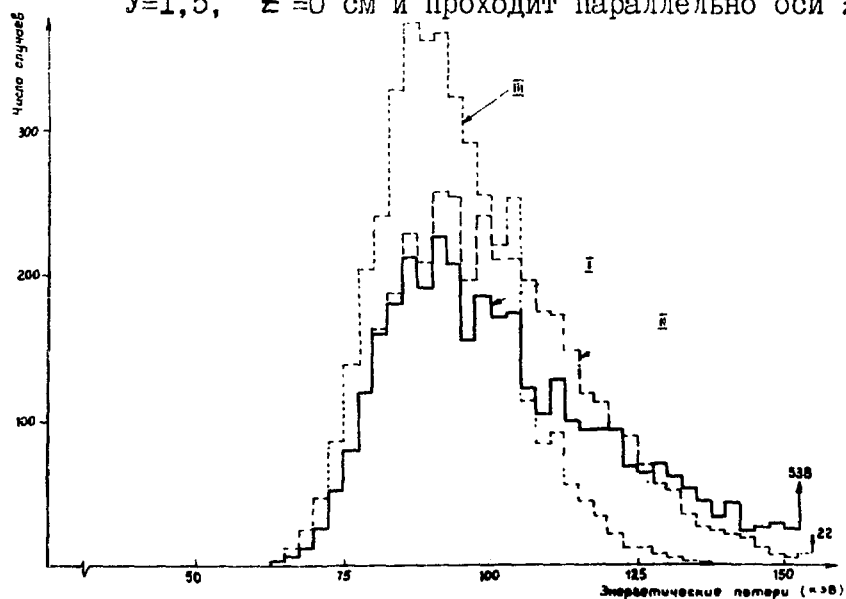


Рис. 2-4. Распределение энергетических потерь, полученных нами при прохождении ядер углерода с энергиями

450 МэВ/нуклон через камеру (рис. I), наполненную смесью (93% Ar + 7% CH₄), толщиной 1,598 мг/см² под давлением 0,1 атм. Гистограммы соответствуют распределениям: I - Ландау-Вавилова, 2 - Бадвара и Адамса и др., 3 - с учетом переноса δ - электронов методом Монте-Карло.



Рис. 3,4 Аналогичные распределения при прохождении ядер неона

и аргона с энергиями 670 и 1800 МэВ/нуклон через газ

толщиной 1,584 и 1,617 мг/см² соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бор Н.А., О торможении быстро движущихся заряженных частиц при прохождении через вещество. Избранные научные труды, М.; Наука, 1970, т. I
2. Ландау Л.Д. О потерях энергии быстрыми частицами на ионизацию. Собрание трудов, М.: Наука, 1969, т. I
3. Вавилов А.В. Ионизационные потери тяжелых частиц больших энергий. ЖЭТФ, 1957, т. 32, с. 921
4. Hasebe N., Kikuchi J., Doke T. et al. Energy Loss of Relativistic Electrons and its Fluctuation in Gas Proportional Counters. NIM, 1978, vol. 155, p. 491-501.
5. Ispirian K.A., Margarian A.T., Zverev A.M. A Monte-Karlo Method for Calculation of the Distribution of Ionization Losses. Scientific Report, EPI-8(72) Yerevan, 1972. NIM 1974, vol. 117, p. 125-129.
6. Cobb J.H., Allison W.W.H., Bunch S.N. The Ionization Loss of Relativistic Charged Particles in Thin Gas Samples NIM, 1976, vol. 133, p. 315.
7. Ermilova V.C., Kotenco L.P., Merzon G.I. Fluctuations and the Most Probable Values of Relativistic Charged Particle Loss in Thin Gas Layers. NIM, 1977, vol. 145, p. 555-563.
8. Badwar G.D. Calculation of the Vavilov Distribution Allowing for Electron Escape from the Absorber. NIM, 1973 vol. 409, p. 119.
9. Adams J.H., Silberberg Ir. R., Badwar G.D. Calculation of the Vavilov Distribution. NIM, 1975, vol. 124, p. 551.
10. Nagata K., Kikuchi J., Doke T., Gruhn C.R. Deposited

- Energy Losses of High Energy Heavy Ions in Thin Gas Layers., NIM, 1981, vol.188, p.217-222.
11. Nagata K., Kikuchi J., Doke T., Gruhn C.R. Deposited Energy Losses of High Energy Heavy Ions in Thin Gas Layers., NIM, 1982, vol.196, p.41-43.
 12. Sternheimer R.M., Peierls R.F. General Expression for the Density Effect for the Ionization Loss of Charged Particles. Phys.Rev. 1971, vol.B3, No.11, p.3681-3692.
 13. Маргарян А.Т. О моделировании переноса электронов в веществе методом Монте-Карло. ЕФИ-564(5I)-82, Ереван, 1982
 14. Маргарян А.Т. Многократное рассеяние в тонких слоях вещества. ЕФИ-43I(38)-80, Ереван, 1980.
 15. Gruhn C.R., Binimi M., Legrein R. et al. Bragg Curve Spectroscopy. NIM, 1982, vol.196, p.33-40.
 16. Breskin A., Johanson T., Polikanov S., Santiard J.C. The TREC A 4 , Low-Pressure Tracking Range and Energy Chamber for Heavy Ionizing Particles. NIM, 1983, vol.217, p.131-134.

Рукопись поступила 15 июля 1986 г.

А.Т.МАРГАРЯН

ФЛУКТУАЦИИ И ВЕРОЯТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ
ЭНЕРГИИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В ТОНКИХ СЛОЯХ ГАЗА

Редактор Л.П.Мукалян

Технический редактор А.С.Абрамян

Подписано в печать 9/Х-86 ВФ-05712 Формат 60x84/16
Офсетная печать. Уч. изд. л. 0,8 Тираж 299 экз. Ц. 10 к.
Зак. тип. № 554 Индекс 3624

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, Маркаряна 2

индекс 3624



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ