

ВЛИЯНИЕ Z^3 -ПОПРАВКИ В ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЯХ ЭНЕРГИИ НА ПРОБЕГИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

С.Д.Богданов, Е.Е.Журкин, В.Ф.Космач, Д.Хассан

*Санкт-Петербургский государственный технический университет
195251 Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 7 июля 1993 г.

После переработки 20 сентября 1993 г.

Впервые проведено комплексное исследование влияния Z^3 -поправки в ионизационных потерях энергии на пробеги ядер Ne, Ar, Fe, Au, U с энергией в диапазоне 0,3–1,2ГэВ/нуклон в ядерной фотозмульсии. Результаты исследования указывают на систематическое несоответствие экспериментальных пробегов тяжелых релятивистских ядер пробегам, рассчитанным с использованием стандартной теории торможения Бете–Блоха. Учет Z^3 -поправки позволяет улучшить согласие между расчетными и экспериментальными данными.

Теоретический расчет ионизационных потерь энергии, выполненный Бете, при котором $(dE/dx) \sim Z^2$, базируется на первом борновском приближении для описания соударения тяжелой частицы с электронами атома. Расчеты в следующем приближении приводят к появлению дополнительного слагаемого в формуле для (dE/dx) , пропорционального соответственно Z^3 (где Z – заряд налетающей частицы). Количественные оценки Z^3 -поправки были сделаны в работе Джексона и Маккартли [1]. Там же было показано, что полученные оценки Z^3 -эффекта в (dE/dx) объясняют экспериментальные различия пробегов π^+ и π^- -мезонов. Тем не менее, разработанная в [2,3] модель успешно применяемая для расчета прохождения нерелятивистских тяжелых ионов с энергией (0,01–10)МэВ/нуклон в однородных средах, не учитывает Z^3 -поправку в ионизационных потерях энергии многозарядных частиц. Более того, в [2] был сделан вывод о том, что введение Z^3 -поправки в соответствие с [1] ухудшает согласие расчетных и экспериментальных данных. В настоящей работе впервые проведено исследование влияния Z^3 -поправки в ионизационных потерях энергии на пробеги ядер Ne, Ar, Fe, Au, U с энергией в диапазоне 0,3–1,2ГэВ/нуклон в ядерной фотозмульсии типа БР-2. Отметим, что выбранные начальные энергии и массы исследуемых частиц более чем в 100 раз превышают массу и энергию, рассмотренные в [1–3].

Камеры, состоящие из 30–35 слоев эмульсии БР-2 стандартного состава [4] (с числом ядер в 1см^3 , $n_i \cdot 10^{-22}$, соответственно Н-3,148; С-1,412; N-0,396; O-0,956; S-0,004; I-0,002; Вг-1,031; Ag-1,036) экспонировались на ускорителе Бэвалак (г.Беркли, США). Камеры были завернуты в два слоя черной бумаги суммарной толщиной $0,024\text{г/см}^2$ и в один слой полиэтилена толщиной $0,017\text{г/см}^2$. Перед проявлением камер в ЛВЭ ОИЯИ (г.Дубна, Россия) проводились измерения толщины каждого слоя эмульсии в четырех симметричных точках. Оказалось, что толщина непроявленного слоя флуктуирует со среднеквадратичным отклонением близким к 4мкм. Прослеживание следов проводилось путем просмотра по следу на микроскопе МБИ-9 при увеличении 40×15 (цена деления окулярной шкалы 2,7мкм). Суммарная статистика составила 1327 следов, при этом для каждого случая было прослежено порядка

200 следов (от 94 для Au до 307 для Ne). Экспериментальные ошибки в измерении длины индивидуального трека были определены путем многократных измерений на реальных следах. Они составили 30 мкм для ядер U и 20 мкм для остальных ядер. Увеличение ошибки измерений в случае U связано с необходимостью проследивать каждый след в двух или трех пластинках. Во всех других случаях следы ускоренных ядер оканчивались в той же пластинке, в какой и начинались.

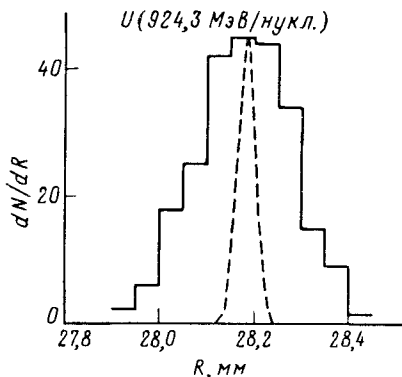


Рис.1. Распределение величин пробегов ядер ^{238}U в эмульсии БР-2 (dN/dR – число ядер, пробег которых попадает в данный интервал по длинам треков R); гистограмма – эксперимент настоящей работы ($R_t = (28,185 \pm 0,02)$ мм; $\Delta R_t = (130 \pm 20)$ мкм); полное число треков $N_{\text{tot}} = 241$; пунктирная линия – распределение Гаусса с параметрами $R_t = R_{\text{exp}} = 28,185$ мм; $\Delta R_t = \Delta R_{\text{calc}} = 17,5$ мкм, нормированное по максимуму

В качестве примера на рис.1 приведено экспериментальное распределение длин треков ядер U с энергией 924,3 МэВ/нуклон, остановившихся в эмульсии БР-2. Там же приведено распределение Гаусса с дисперсией, соответствующей расчетному страгглингу, вычисленному исходя из данных по страгглингу протонов той же скорости согласно [5] с учетом обратно-пропорциональной зависимости относительного страгглинга $\Delta R_t/R_t$ от $M^{1/2}$, где M – масса иона. Из рис.1 видно, что реальный разброс пробегов $(\Delta R_t/R_t)_{\text{exp}}$ больше его теоретической оценки, что может быть связано с кулоновским рассеянием тяжелого ядра на атомах среды, а также с энергетическим разбросом пучка $\Delta E/E$ при облучении и ошибками измерений. При этом наблюдаемый относительный разброс $(\Delta R_t/R_t)_{\text{exp}}$, который составил в среднем 0,8% (от 0,46% для U до 0,98% для Au) может служить в качестве верхней оценки величины $\Delta E/E$. Заметим, что ошибки величины среднего пробега R_t определялись с учетом экспериментальной дисперсии распределения длин пробегов.

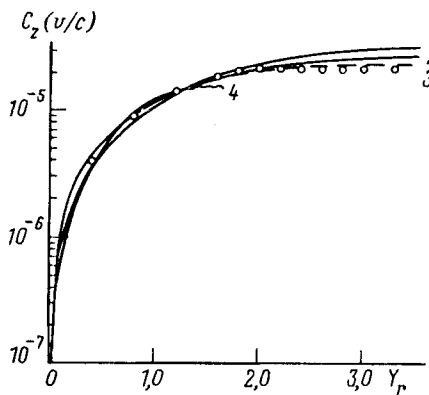


Рис.2. Зависимость поправки к пробегу иона в эмульсии Ilford G5 (C_z) от его скорости, выраженной в единицах скорости электрона на K-оболочке ($\gamma_r = 137(v/c)/Z$; см. текст). Точки – универсальная кривая [9], построенная по экспериментальным данным [9] для ядер с $6 \leq Z \leq 20$; кривые – расчет по программе RANGE для ядер ^{20}Ne (1), ^{40}Ar (2), ^{56}Fe (3), ^{197}Au (4)

Расчеты пробегов проводились по программам PRAL [3] и RANGE [6], применимость которых в области энергий до 1 МэВ/нуклон была показана ранее. Проверка применимости [3, 6] для частиц с энергией до 1 ГэВ/нуклон проводилась с использованием экспериментальных и расчетных данных Баркаса [7] по пробегам протонов в эмульсии Ilford G5. Сравнительный анализ данных показал, что расчеты по обсем программам (PRAL и RANGE) систематически занижают пробеги частиц на 2% по сравнению с экспериментом и расчетом Баркаса [7,8]. С учетом этого систематического занижения пробегов наибольшее различие теоретических и экспериментальных данных в расчетах Баркаса и настоящей работе не превышает (1,5–2)%. При этом отличие пробегов, рассчитанным по PRAL и RANGE не превышает 0,1%. Тестирование программ было продолжено расчетами прохождения тяжелых ионов с энергией до 1 ГэВ/нуклон в эмульсиях БР-2 и G5. В [9] использовалась полуэмпирическая формула, в которой пробег тяжелого иона массы M и заряда $Z - R(\beta)$ связан с пробегом протона той же скорости $v - \lambda(\beta)$ (где $\beta = v/c$, c - скорость света) как

$$R(\beta) = \frac{M}{Z^2} \lambda(\beta) + C_z(\beta/Z) M Z^{2/3}, \quad (1)$$

где поправка $C_z(\beta/Z)$ обусловлена захватом электронов при малых скоростях иона. Она обычно считается универсальной функцией от (β/Z) для данной эмульсии [9]. Расчеты по программе RANGE и сравнение этих данных с результатами [9] показали (рис.2), что на самом деле "универсальность" $C_z(\beta/Z)$ может быть принята только с погрешностью на уровне 10%, так как для тяжелых ионов типа Au, U $C_z(\beta/Z)$ заметно быстрее выходит на "плато" с ростом скорости иона, а величина "плато" меньше, чем для ядер Ne, Ar, Fe. Однако относительный вклад поправки, связанной с C_z в формуле (1), не превышает 2% в рассматриваемом диапазоне энергий как для эмульсии Ilford G5, так и для БР-2.

Пробеги тяжелых ионов в фотоэмульсии БР-2 стандартного состава

Тип иона	Энергия МэВ/нуклон	Эксперимент настоящей работы R_t , мм	Расчет настоящей работы (RANGE)		Расчет по программе PRAL R_p , мм
			без учета Z^3 -поправки R_t , мм	с учетом Z^3 -поправки R_t , мм	
Ne	389,4	61,75 ± 0,06	58,67 (+4,99%)	58,06 (+5,21%)	58,68
Ar	504,2	53,11 ± 0,05	54,23 (-2,11%)	53,33 (-0,40%)	54,25
Fe	498,7	34,84 ± 0,01	35,71 (-2,50%)	34,91 (-0,20%)	35,72
Fe	980,84	95,16 ± 0,04	96,05 (-0,94%)	94,05 (+1,17%)	96,10
Au	1147,2	42,83 ± 0,05	45,76 (-6,89%)	43,44 (-1,42%)	45,81
U	924,3	28,185 ± 0,02	30,66 (-8,78%)	28,86 (-2,40%)	30,68

Измеренные и рассчитанные пробеги тяжелых ионов в эмульсии БР-2 стандартного состава [4] приведены в таблице. (В скобках указана величина относительного отклонения расчетных значений пробегов от экспериментальных $\delta = [(R_{exp} - R_{calc})/R_{exp}] \cdot 100\%$). Из таблицы видно, что расчеты пробегов по

объем программ практически совпадают между собой, при этом удовлетворительно согласуясь с экспериментальными данными: относительное разногласие δ систематически изменяется с ростом Z иона от +5% для Ne до -8,98% для U.

Для того чтобы оценить влияние Z^3 -поправки, нами были проведены расчеты, учитывающие ее в рамках модели [1]. При этом тормозная способность тяжелого иона скорости $v - S_e(v)$ представляется в виде

$$S_e(v) = Z_{eff}^2(v) S_p(v) (1 + Z_{eff}(v)(J/I)); \quad (2)$$

где $S_p(v)$ – тормозная способность протона той же скорости v ; Z_{eff} – эффективный заряд иона, вычисляемый согласно [3]; J/I вычисляется согласно [1]. Ионизационные потери энергии вычисляются по правилу Брегга. При этом относительная добавка к "стандартному" dE/dx составляет 5,7%, 5,1% соответственно для ионов U (с энергией 924,3 МэВ/нуклон) и Au(1147,2 МэВ/нуклон) и менее 2% для остальных ионов. Результаты расчетов полных пробегов ионов с учетом вклада Z^3 -поправки приведены в предпоследнем столбце таблицы. Видно, что согласие с экспериментом для тяжелых ядер (Au, U) заметно улучшилось, а также практически исчезло систематическое завышение расчетного пробега с ростом Z .

Таким образом, проведенное исследование полных пробегов тяжелых ядер в фотоэмульсии однозначно показало, что для ядер типа Au, U расчеты, использующие пропорциональность $(dE/dx) \sim Z^2$, вытекающую из первого борновского приближения, дают заметную систематическую ошибку. Учет более высоких степеней Z иона приводит к адекватному описанию эксперимента. При этом следует особо подчеркнуть общую природу явления. Аппроксимации для J/I , подобранные в [1] для согласования пробегов π^+ - и π^- -мезонов оказались применимы к прохождению ядер, имеющих почти в 100 раз больший заряд и почти в 1500 раз большую массу.

-
1. J.D.Jackson and R.L.McCartly, Phys. Rev. **B6**, 4131 (1972).
 2. J.F.Ziegler and G.J.Iafate, Radiat. Eff. **46**, 199 (1980).
 3. J.F.Ziegler, J.P.Biersak, and U.Littmark. The Stopping and Range of Ions in Solids, vol.1, Pergamon Press, N.J., 1985.
 4. ВДКЛМТУ – Б.Сотрудн. Э.Скжипчак, А.Яхолковска, М.Карабова, Э.Силеш и др. Общие характеристики неупругих взаимодействий α -частиц с импульсом 17 ГэВ/с с группами ядер (C,O) и (Ag,Br). – Сообщения ОИЯФ, РИ-9364, Дубна, 1975.
 5. А.Бонетти и др. Ядерные эмульсии, М.: Физматгиз, 1961.
 6. Е.Е.Журкин, С.Н.Купцов, Д.П.Иванов. В кн.: "Новые технологии получения и свойства материалов. Синергетика.", т.2, М., 1991, с.179.
 7. W.H.Barkas et al., Nuovo Cim. **8**, 185 (1958).
 8. W.H.Barkas, Nuovo Cim. **8**, 201 (1958).
 9. H.N.Heckman, B.L.Perkins, W.G.Simon et al., Phys. Rev. **117**, 544 (1960).