

объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

P1-85-351

Г.Г.Воробьев, К.Д.Толстов

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПРОБЕГИ
И ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ
ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ И ЛЕГКИХ ЯДЕР

Направлено в журнал "Приборы и техника эксперимента"

1985

Знание ионизационных потерь энергии и пробегов быстрых частиц необходимо в связи с расширяющейся программой исследований с релятивистскими ядрами и созданием аппаратуры. Нами были выполнены расчеты ионизационных потерь энергии и ионизационных пробегов частиц пучков протонов, ядер дейтерия, гелия и углерода с энергиями до 10 ГэВ на нуклон ядра в бетоне, железе, свинце и уране.

Для расчета потерь энергии на ионизацию необходимо знание не только средней скорости потерь энергии $-dE/dx$, но и сечений неупругих взаимодействий, которые известны в ограниченном диапазоне энергии и массы частиц пучка для указанных сред. Имеющиеся в настоящее время аппроксимирующие формулы дают хорошее согласие расчетных величин сечений неупругих взаимодействий ядер с известными опытными данными, и они были использованы нами.

В работе ^{1/1} при энергии налетающих ядер в области ~ 2 ГэВ на нуклон формула для сечения неупругих взаимодействий ядер с ядрами σ дается выражением:

$$\sigma = \pi R^2 (A_n^{1/3} + A_c^{1/3} - B)^2 \quad /1/$$

где A_n и A_c - массовые числа ядер пучка и среды соответственно, $R_0 = 1,25$ Фм, $B = 1,56 - 0,20(A_n^{1/3} + A_c^{1/3})$.

В работе ^{2/2} используется та же формула /1/ для диапазона энергий пучковых частиц 0,4 - 5 ГэВ на нуклон, где $R_0 = 1,46$ Фм и $B = 1,21$. Для среды из смеси ядер мы вычисляли $\sigma_{\text{смеси}} = \sum \sigma(i)$ с учетом парциальной плотности компонент. В соответствии с приведенной формулой для σ нами были рассчитаны средние пробеги λ до неупругого взаимодействия по формуле:

$$\lambda = A_c / N_A \sigma \quad /2/$$

где A_c , N_A и σ - массовое число ядер среды, число Авогадро и сечение неупругого взаимодействия налетающего ядра со средой. Величины средних пробегов λ приведены в табл.1, причем для протонов указаны также и экспериментальные значения ^{3/3} для энергий в диапазоне 1,5 - 20 ГэВ.

Как можно видеть из таблицы, расчетные и экспериментальные величины пробегов λ до неупругого взаимодействия для протонов отличаются друг от друга в пределах 10-17%. При энергии ниже $\sim 0,5$ ГэВ на нуклон налетающего ядра возможно большее отличие расчетных величин пробегов от действительных, однако для таких энергий пробег частиц до остановки становится малым, и поз-

тому для пучков с энергиями частиц ниже ~1 ГэВ на нуклон существенно влияние изменения сечения с энергией на результирующую величину относительных ионизационных потерь энергии.

Таблица 1

Средние пробеги λ до неупругого взаимодействия ($\Gamma/\text{см}^2$)

	$R_{\text{эксп.}}$	$R_{\text{расчет}}$	Д	^4He	^{12}C
Бетон	99,9	89,6	73,3	58,7	39,2
Железо	131,9	110	95,3	80,7	58,7
Свинец	193,7	160	145	130	106
Уран	199,3	166,3	152	137	112

На элементе пробега от X до $X + dx$ ионизационные потери испытывают ионы пучка, прошедшие без неупругого столкновения расстояние X , вероятность чего дает для числа частиц пучка множитель $e^{-X/\lambda}$. Тогда относительные потери энергии пучка частиц на ионизацию при пробеге частиц пучка до остановки будут определяться по формуле:

$$\Delta = - \frac{1}{E_0} \int_0^{X_{\text{max}}} e^{-X/\lambda} \frac{dE}{dX} dX, \quad /3/$$

где E_0 - начальная кинетическая энергия частиц пучка. Пробеги X_{max} определялись суммированием элементов длин dX , на которых вычислялись и вычитались из кинетической энергии частиц средние ионизационные потери энергии, вплоть до ее остановки. Мы использовали для средней скорости потерь энергии - dE/dX - частицей на ионизацию на единице длины формулу Бете-Блоха ^{/4/}, а длина среднего пробега до неупругого столкновения бралась нами не зависящей от энергии налетающей частицы, т.е. в соответствии со значениями, приведенными в табл.1. В формуле для $-dE/dX$ мы использовали эмпирические константы, которые давали совпадение рассчитанных минимальных значений $-dE/dX$ для протонов в указанных средах, при энергиях, соответствующих минимуму ионизации. Подобранные для заданной среды константы в формуле для $-dE/dX$, полученные для протонов, использовались нами также и для частиц, отличающихся от протонов по массе и заряду.

Таблица 2

Ионизационные пробеги протонов и ядер Д, ^4He и ^{12}C в разных средах /Пробег в см./

$E_{\text{кин./нуклон}}$ ГэВ	БЕТОН				ЖЕЛЕЗО				СВИНЕЦ				УРАН			
	Р	Д	^4He	^{12}C	Р	Д	^4He	^{12}C	Р	Д	^4He	^{12}C	Р	Д	^4He	^{12}C
0,1	3,2	6,5	3,2	1	1,2	2,4	1,2	0,4	1,2	2,3	1,2	0,4	0,7	1,4	0,7	0,24
0,2	11	22	11	3,7	4,1	8,2	4,1	1,3	3,9	7,8	3,9	1,3	2,4	4,8	2,4	0,8
0,5	51	102	51	17	19	38	19	6,1	18	35	18	5,9	11	22	11	3,6
0,7	86	172	86	29	32	63	32	10,3	30	59	30	9,9	18	36	18	6,1
1	145	290	145	49	54	107	54	17,4	50	100	50	16,6	30	61	30	10
1,4	231	462	231	77	85	170	85	27,7	80	158	80	26	48	96	48	16
2	367	739	367	122	135	269	135	44	124	250	125	41	76	153	77	25,6
3	602	1200	602	200	221	440	221	72	202	408	204	68	125	250	125	42
5	1070	2140	1070	360	390	780	390	130	360	720	360	120	220	440	220	74
8	1770	3540	1770	590	650	1290	650	216	590	1180	590	195	364	728	363	106
10	2220	4440	2220	740	815	1620	814	271	740	1480	740	244	455	912	454	152

Для бетона при расчете использовалась плотность 2,5 $\Gamma/\text{см}^3$ и состав: $\text{O}_2 = 52\%$, $\text{Si} = 32,5\%$, $\text{Ca} = 6\%$, $\text{Na} = 1,5\%$, $\text{Fe} = 4\%$ и $\text{Al} = 4\%$.

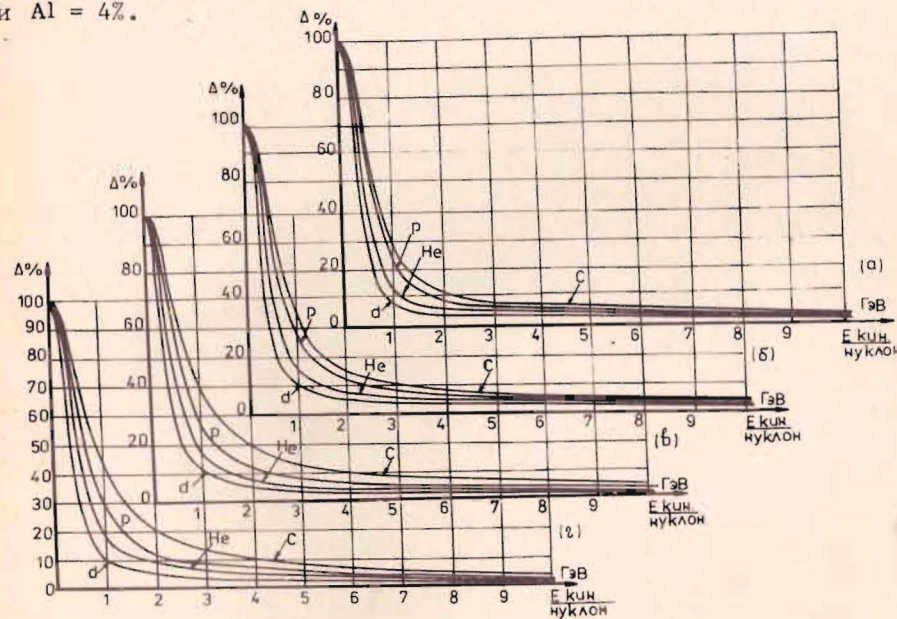


Рис. Относительные ионизационные потери энергии протонов и ядер дейтерия, гелия и углерода /а/ - в бетоне, /б/ - железе, /в/ - свинце, /г/ - уране.

Результаты расчетов ионизационных пробегов и относительных ионизационных потерь энергии приведены в табл.2 и на рисунке. Сравнение полученных величин пробегов протонов в свинце с известными данными ^{15/} дает совпадение в пределах нескольких процентов. Аналогичная точность расчетов пробегов получается также для других сред и частиц. Для величин Δ мы оцениваем точность результатов не хуже ~ 15%.

Как следует из таблицы и рисунка, различия ионизационных потерь урана и свинца малы. Однако большая плотность урана может обеспечить лучшую геометрию защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jacobson B., Kukberg R. Phys. Scr. 13, 1976, p.327.
2. Ангелов Н. и др. ОИЯИ, P1-80-473, 1980.
3. Particle properties data, Phys. Lett., 1982, 111B, p.42.
4. Particle properties, data, Phys.Lett., 1982, 111D, p.34.
5. Добротин Н.А. Космические лучи. ГИТТЛ, М., 1954.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 мая 1985 года

Воробьев Г.Г., Толстов К.Д.
Ионизационные пробеги
и относительные ионизационные потери
энергии протонов и легких ядер

P1-85-351

Приводятся результаты расчетов ионизационных пробегов и относительных ионизационных потерь энергии протонов, дейтронов, ядер гелия и углерода в бетоне, железе, свинце и уране. Используется формула Бете-Блоха с эмпирическими поправками для указанных сред и учитывается неупругое взаимодействие частиц пучка с энергиями до 10 ГэВ на нуклон.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Vorobiev G.G., Tolstov K.D.
Ionization Ranges and Relative
Ionization Energy Losses of Proton
and Light Nuclei

P1-85-351

The results of calculating ionization ranges and relative ionization energy losses of protons, deuterons, helium and carbon nuclei in concrete, iron, lead and iranium using the Bethe-Bloch formula with empirical corrections for these media and taking into account inelastic interaction of beam particles with upto 10 GeV/nucleon energies are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985