

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

13-84-823

Н.К. Жидков, М.Д. Трайкова

ПОПРАВКИ
НА НЕУПРУГОЕ ЯДЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ
В КРИСТАЛЛАХ Si, Ge, NaI, CsI

Направлено в журнал
"Nuclear Instruments and Methods"

1984

ВВЕДЕНИЕ

Для идентификации легких ядер и измерения их энергии в спектрометрах широко применяются полупроводниковые (Si, Ge) и сцинтилляционные (NaI(Tl), CsI(Tl)) детекторы. При регистрации ядер часть f из них испытывает ядерное взаимодействие с веществом детектора с сечением реакции $\sigma_R = \sigma_{TOTAL} - \sigma_{ELASTIC}$ и выбывает из заданного энергетического интервала регистрации. Поправка f может достигать 50% и более. В литературе имеются данные о таких поправках на взаимодействие протонов с кристаллами Si, Ge, NaI, CsI^{/1,2,3/} и на взаимодействие d , 3He , 4He с NaI^{/4,5/}. В работе^{/5/} сделан теоретический расчет поправок f на взаимодействие изотопов водорода и гелия с кристаллом NaI.

В настоящей работе единым методом выполнен теоретический расчет поправок f для ядер p , d , t , 3He , 4He в кристаллах Si, Ge, NaI, CsI в интервале энергий от 1 до 500 МэВ. В работах^{/1-4/} для вычисления поправок f использованы значения сечений взаимодействий ядер с кристаллами, полученные экстраполяцией из экспериментальных данных. Ввиду незначительного количества экспериментальной информации о сечениях, в настоящей работе они вычисляются теоретически с применением модели дифракционного рассеяния. При энергиях ≥ 50 МэВ использованный метод вычисления сечений аналогичен методу работы^{/5/}.

1. РАСЧЕТ ПОПРАВОК НА ЯДЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Пусть (A_1, Z_1) , (A_2, Z_2) - массовые и зарядовые числа регистрируемых ядер (p , d , t , 3He , 4He) и ядер вещества детекторов (Si, Ge, Na, Cs, I) соответственно. Для простоты ядра (A_1, Z_1) и (A_2, Z_2) будем называть ядрами 1 и 2.

В слое вещества толщиной dx поток N ядер за счет взаимодействия с веществом с сечением реакции σ_R изменяется на величину

$$dN = -N \frac{N_A}{A} \rho \sigma_R dx = N \frac{N_A}{A} \sigma_R \frac{dE}{(-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx})} \quad /1/$$

Здесь N_A - число Авогадро, A и ρ - молекулярный вес и плотность вещества, $-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$ - плотность ионизационных потерь ядра 1 с кинетической энергией E в детекторе. Для детектора NaI /аналогич-

но для CsI /

$$(\sigma_R)_{NaI} = (\sigma_R)_{Na} + (\sigma_R)_I \quad /2/$$

$$\left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}\right)_{NaI} = \frac{A_{Na}}{A_{NaI}} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}\right)_{Na} + \frac{A_I}{A_{NaI}} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}\right)_I \quad /3/$$

Из соотношения /1/ следует формула для вероятности неупругого ядерного взаимодействия ядра 1 в конечном слое вещества, в котором оно в среднем теряет на ионизацию энергию $E - E_1$

$$f(E, E_1) = \frac{\Delta E}{N} = 1 - \exp\left[-\frac{N_A}{A} \int_{E_1}^E \sigma_R(E) \frac{dE}{(-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx})}\right] \quad /4/$$

При работе детектора в режиме полного поглощения ($E_1 \approx 0$), будем обозначать $f \equiv f(E, 0)$. Из /4/ видно, что для вычисления поправки f нужно знать функции $-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$ и σ_R в зависимости от энергии E . Мы используем данные по плотности ионизационных потерь $-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$, приведенные в работе^{/6/}. В литературе имеется мало сведений о сечениях взаимодействия ядер, поэтому возникает необходимость вычислять сечения σ_R теоретически.

Сечение реакции ядер 1 и 2 можно представить в виде

$$\sigma_R(E) = W(E) \cdot \sigma_{in}(E) \quad /5/$$

где $W(E)$ - вероятность прохождения ядрами потенциального барьера, создаваемого кулоновскими и центробежными силами отталкивания ядер; $\sigma_{in}(E)$ - полное сечение неупругого ядерного взаимодействия. При низких энергиях для сферически-симметричных ядер^{/7,8/}

$$\sigma_R(E_c, E_0) = \frac{R_0^2}{2} \frac{\hbar\omega_0}{E_c} \ln\{1 + \exp[2\pi \frac{E_c - E_0}{\hbar\omega_0}]\} \quad /6/$$

где $E_c = [\sqrt{(M_1 + M_2)^2 + 2EM_2} - (M_1 + M_2)]$ - суммарная кинетическая энергия ядер в системе центра масс, M_1 и M_2 - массы ядер; E_0 , R_0 , $\hbar\omega_0$ - параметры барьера / E_0 - высота барьера, R_0 - расстояние между центрами ядер, $\hbar\omega_0$ характеризует ширину барьера/; $R_0 = R_1 + r_0 A_2^{1/3}$, $r_0 = 1,416$ фм, $R_1 = /1,443; 2,187; 3,506; 2,534$ фм/ для p , d , t , 3He , 4He соответственно, и $\hbar\omega_0 \approx 4$ МэВ. Для учета деформации ядер сечение /6/ усредняется по высоте барьера E_0 ^{/8/}:

$$\sigma_R(E_c) = \frac{1}{2\Delta} \int_{\bar{E}_0 - \Delta}^{\bar{E}_0 + \Delta} \sigma_R(E_c, E_0) dE_0. \quad /7/$$

Здесь $\bar{E}_0 = Z_1 Z_2 e^2 / R_e$, $R_e = R_1 + r_e A_2^{1/3}$, где параметр r_e находится по графикам работы /8/, а $\Delta = 3 \text{ МэВ} / 8/$.

При $E_c \gg \bar{E}_0$ выражение /7/ сводится к классической формуле

$$\sigma_R(E_c) = \pi R_0^2 \left(1 - \frac{\bar{E}_0}{E_c}\right). \quad /8/$$

Сравнивая ее с формулой /5/, видим, что геометрическое сечение πR_0^2 играет роль σ_{in} , а $(1 - \bar{E}_0/E_c)$ - вероятности прохождения ядер через барьер. По аналогии считаем, что выражение для вероятности прохождения ядер через барьер при любой энергии имеет вид

$$W(E_c) = \sigma_R(E_c) / (\pi R_0^2). \quad /9/$$

При расчете величины f в формуле /4/ взято $E_1 = 0,2 \bar{E}_0$, а σ_R вычисляется двумя способами: при $E < 2\bar{E}_0$ - по формуле /7/, а при $E > 2\bar{E}_0$ - по формуле /5/ с использованием выражения /9/ для $W(E)$ и оптического приближения модели дифракционного рассеяния /9,10,11/ для $\sigma_{in}(E)$.

$$\sigma_{in}(E) = 2\pi \int_0^\infty \{1 - \exp[-4 \text{Im} \chi(b)]\} b db, \quad /10/$$

где мнимая часть фазы

$$\text{Im} \chi(\vec{b}) = [(Z_1 Z_2 + N_1 N_2) \sigma_{pp}(E_N) + (Z_1 N_2 + N_1 Z_2) \sigma_{pn}(E_N)] \frac{T(b)}{4A_1 A_2}, \quad /11/$$

а

$$T(b) = \int_{-\infty}^{\infty} dz \int d\vec{r}' \rho_1(\vec{r} - \vec{r}') \rho_2(\vec{r}'). \quad /12/$$

Здесь σ_{pp} , σ_{pn} - полные сечения pp и pn ядерного взаимодействия /взяты из работы /12//; $E_N = E/A_1$ - кинетическая энергия на нуклон ядра 1 в лабораторной системе; ρ_1 , ρ_2 - распределения плотности ядер 1 и 2, нормированные на числа нуклонов; $\vec{r} = \vec{b} + \vec{z}$, \vec{b} - прицельный параметр в плоскости, перпендикулярной оси z ; $N_1 = A_1 - Z_1$; $N_2 = A_2 - Z_2$.

Плотность ρ_1 взята в гауссовой форме

$$\rho_1(\vec{r}) = A_1 \left(\frac{3}{2\pi R^2}\right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{3\vec{r}^2}{2R^2}\right), \quad /13/$$

где R - среднеквадратичный радиус; $R_p = 0,8 \text{ фм} / 9/$; $R_d = 2,794 \text{ фм} / 13/$; $R_{\text{He}} = 1,77 \text{ фм} / 9/$; $R_t = R_{\text{He}}$; $R_{\text{He}} = 1,674 \text{ фм} / 14/$.

Из-за недостатка экспериментальных данных о плотностях $\rho_2(\vec{r})$ для вычисления сечения σ_{in} используем экстраполяцию по массовому числу A_2 . Для каждой энергии E_N вычисляем сечения взаимодействия σ_{in} ядра 1 с ядрами ^{28}Si и ^{140}Ce , по ним /аналогично работе /15// находим параметры прямой $(\sigma_{in})^{1/2} = C_0 + C_1 A_2^{1/3}$ и по известным параметрам C_0 , C_1 вычисляем сечение σ_{in} для любого ядра 2 с массовым числом A_2 . Для ядер ^{28}Si и ^{140}Ce взяты распределения плотности /9/

$$\rho_2(\vec{r}) = \frac{C(1 + \omega \vec{r}^2 / R_2^2)}{1 + \exp\left(\frac{r - R_2}{a}\right)}, \quad /14/$$

где для ^{28}Si : $\omega = -0,122$; $a = 0,57$; $R_2 = 3,21 / 9/$; для ^{140}Ce : $\omega = 0$; $a = 0,51$; $R_2 = 5,82 / 9/$. Нормировочная константа C определяется с помощью численного интегрирования из соотношения $4\pi \int \rho_2(\vec{r}) r^2 dr = A_2$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис.1 приведены результаты расчетов сечений реакций σ_R ядер p , d , t , ^3He , ^4He с кристаллами Si , Ge , NaI , CsI . Для сравнения на рисунке нанесены экстраполированные экспериментальные значения сечений реакции протонов с теми же кристаллами /2,3/. На рис.2 и в таблице приведены результаты расчета величин поправок f ядер p , d , t , ^3He , ^4He в кристаллах Si , Ge , NaI , CsI . Для сравнения на рис.2 нанесены экспериментальные значения величины f для протонов /3/ и ^3He /5/ в кристалле NaI . Расчетные данные величины f для протонов совпадают с экспериментальными в пределах 0,6%, а для ^3He - в пределах 13%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе теоретически вычислены сечения реакции и поправки на неупругое ядерное взаимодействие изотопов водорода и гелия в кристаллах Si , Ge , NaI , CsI в интервале энергий от 1 до 500 МэВ. Приведены графики сечений реакции и поправок, а также таблица поправок f . Метод расчета применим и для других ядер в веществе.

Авторы выражают благодарность П.В.Номоконову и Н.Л.Горшковой за помощь в организации обмена информацией на магнитных лентах между различными ЭВМ, В.А.Никитину и И.А.Савину за обсуждение работы.

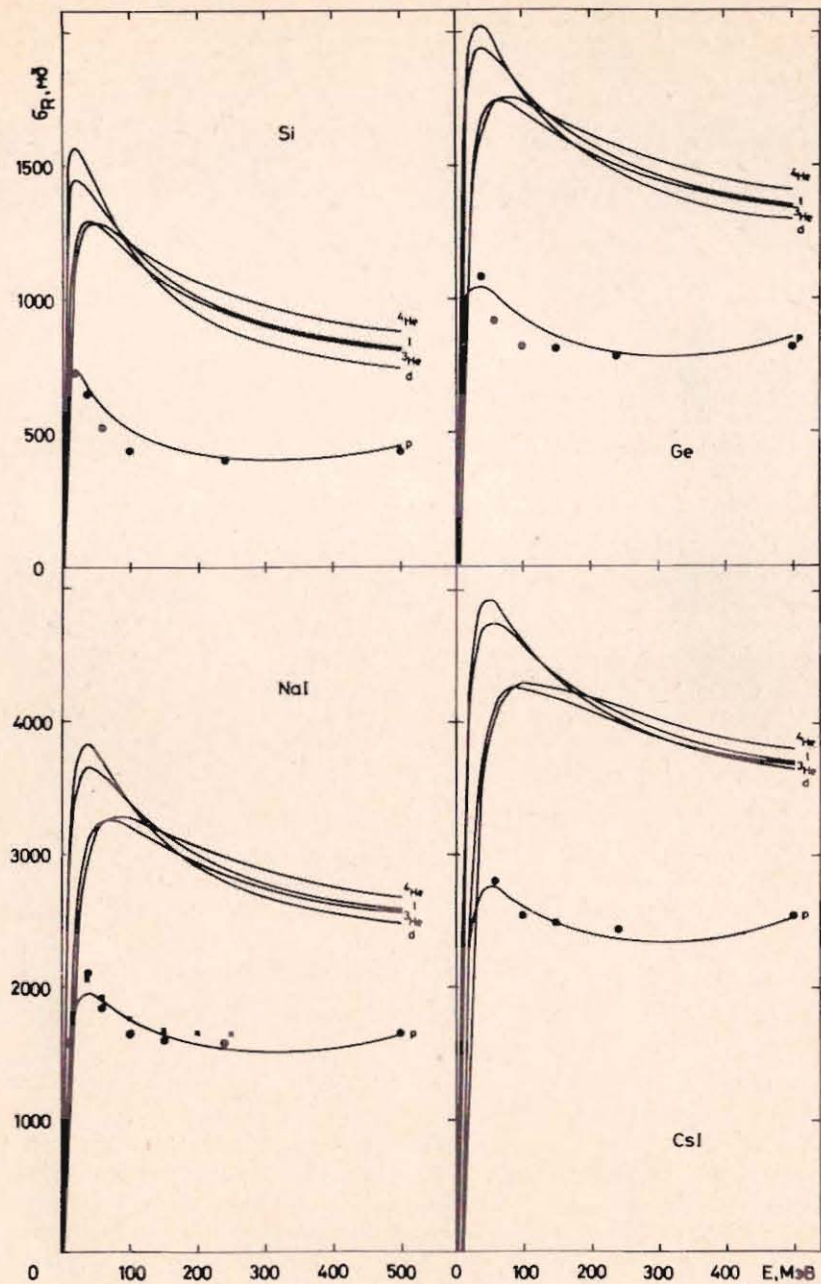


Рис.1. Сечения реакций взаимодействия ядер $p, d, t, ^3\text{He}, ^4\text{He}$ с кристаллами Si, Ge, NaI, CsI. Кривые изображают вычисленные значения сечений реакций. Точками и крестиками показаны значения сечений из работ ^{2/} и ^{3/} соответственно.

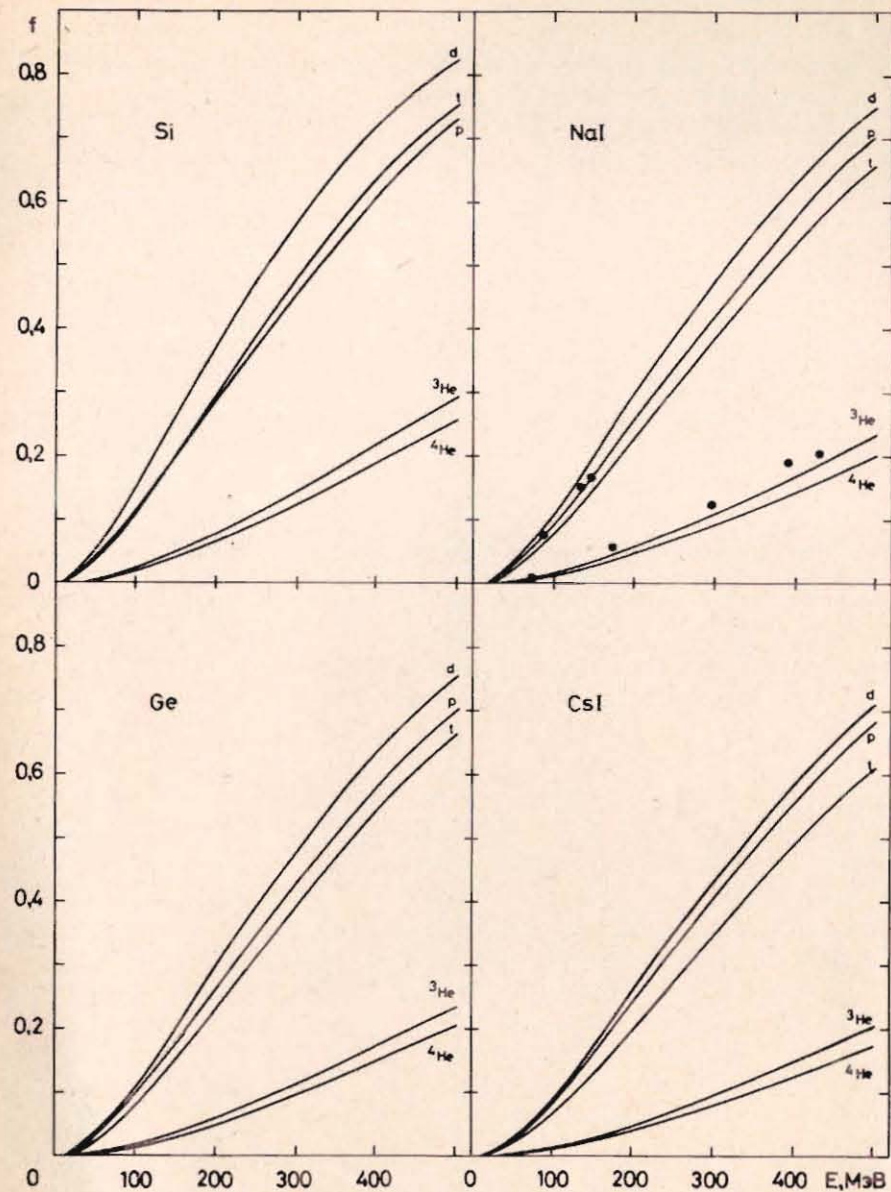


Рис.2. Расчетные значения поправок f на ядерное взаимодействие ядер $p, d, t, ^3\text{He}, ^4\text{He}$ с кристаллами Si, Ge, NaI, CsI. Точками показаны экспериментальные значения для протонов ^{3/} и ^3He ^{5/} в кристалле NaI.

Таблица

Поправки на неупругое ядерное взаимодействие изотопов
водорода и гелия в кристаллах Si, Ge, NaI CsI

Кристалл	E (МэВ)	f				
		p	d	t	³ He	⁴ He
Si	20	0,008	0,010	0,007	0,001	0,001
	30	0,017	0,021	0,015	0,003	0,002
	40	0,028	0,036	0,025	0,005	0,004
	60	0,055	0,070	0,049	0,011	0,009
	80	0,085	0,109	0,079	0,019	0,015
	100	0,117	0,152	0,111	0,027	0,022
	150	0,204	0,265	0,201	0,052	0,043
	200	0,292	0,375	0,297	0,082	0,069
	250	0,378	0,478	0,392	0,114	0,097
	300	0,460	0,571	0,481	0,148	0,128
350	0,537	0,652	0,563	0,183	0,160	
400	0,608	0,721	0,636	0,220	0,193	
450	0,674	0,779	0,701	0,257	0,227	
500	0,733	0,827	0,756	0,294	0,261	
Ge	20	0,005	0,005	0,004	0,001	0,000
	30	0,012	0,013	0,010	0,002	0,001
	40	0,021	0,023	0,017	0,003	0,002
	60	0,042	0,048	0,034	0,007	0,006
	80	0,068	0,078	0,056	0,013	0,010
	100	0,097	0,111	0,081	0,019	0,015
	150	0,177	0,202	0,152	0,038	0,031
	200	0,262	0,298	0,231	0,060	0,050
	250	0,347	0,392	0,312	0,086	0,072
	300	0,430	0,482	0,392	0,113	0,096
350	0,507	0,564	0,469	0,142	0,121	
400	0,580	0,637	0,541	0,173	0,148	
450	0,646	0,701	0,607	0,204	0,176	
500	0,706	0,756	0,667	0,236	0,205	

Таблица /продолжение/

Кристалл	E (МэВ)	f				
		p	d	t	³ He	⁴ He
NaI	20	0,005	0,005	0,004	0,001	0,000
	30	0,011	0,013	0,010	0,002	0,001
	40	0,020	0,023	0,017	0,003	0,002
	60	0,041	0,047	0,034	0,007	0,005
	80	0,066	0,077	0,056	0,012	0,010
	100	0,095	0,109	0,081	0,018	0,015
	150	0,174	0,200	0,151	0,037	0,030
	200	0,258	0,295	0,229	0,059	0,049
	250	0,343	0,389	0,310	0,085	0,071
	300	0,425	0,477	0,389	0,112	0,095
	350	0,502	0,559	0,466	0,140	0,120
	400	0,574	0,632	0,537	0,171	0,146
	450	0,640	0,696	0,603	0,202	0,174
	500	0,706	0,751	0,663	0,233	0,203
	CsI	20	0,003	0,003	0,003	0,000
30		0,009	0,009	0,007	0,001	0,001
40		0,016	0,017	0,013	0,002	0,001
60		0,035	0,037	0,027	0,005	0,004
80		0,058	0,062	0,046	0,009	0,007
100		0,085	0,091	0,067	0,015	0,011
150		0,160	0,171	0,128	0,030	0,025
200		0,242	0,258	0,198	0,050	0,041
250		0,326	0,346	0,272	0,072	0,059
300		0,407	0,432	0,346	0,096	0,080
350	0,484	0,513	0,419	0,122	0,103	
400	0,556	0,587	0,488	0,149	0,126	
450	0,623	0,653	0,554	0,177	0,151	
500	0,683	0,711	0,614	0,207	0,177	

ЛИТЕРАТУРА

1. Measday D.F., Richard-Serre C. Preprint CERN, 69-17, Geneva, 1969.
2. Measday D.F., Richard-Serre C. Nucl. Instr. and Meth., 1969, 76, p.45.
3. Goulding C.A., Rogers J.G. Nucl. Instr. and Meth., 1978, 153, p.511.
4. Measday D.F., Shneider R.J. Nucl. Instr. and Meth., 1966, 42, p.29.

5. Абашидзе Л.И. и др. ОИЯИ, 13-83-707, Дубна, 1983.
6. Williamson C.F., Boujot J.-P., Picard J. Tables of Range and Stopping Power of Chemical Elements for Charged Particles of Energy 0.5 to 500 MeV. Rapport CEA-R 3042, Juillet, 1966.
7. Wong C.Y. Phys.Rev.Lett., 1973, 31, p.766.
8. Vaz L.C., Alexander J.M. Phys.Rev., 1974, C10, p.464.
9. Barshay S., Dover C.B., Vary J.P. Phys.Rev., 1975, C11, p.360.
10. Ситенко А.Н. Теория ядерных реакций. Энергоатомиздат, М., 1983.
11. Элтон Л. Размеры ядер. ИИЛ, М., 1962.
12. Барашенков В.С. Сечения взаимодействия элементарных частиц. "Наука", М., 1966.
13. Franco V., Glauber R.J. Phys.Rev., 1966, 142, p.1195.
14. Sick I., McCarthy J.S., Whitney R.R. Phys.Lett., 1976, B64, p.33.
15. Millburn G.P. et al. Phys.Rev., 1954, 95, p.1268.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 декабря 1984 года.

Жидков Н.К., Трайкова М.Д. 13-84-823
Поправки на неупругое ядерное взаимодействие изотопов
водорода и гелия в кристаллах Si, Ge, NaI, CsI

Выполнен теоретический расчет потерь на ядерное взаимодействие $p, d, t, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}$ в кристаллах Si, Ge, NaI, CsI в интервале энергий от 1 до 500 МэВ. Результаты расчетов сравнены с известными экспериментальными данными.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Zhidkov N.K., Trajkova M.D. 13-84-823
Corrections Due to Inelastic Nuclear Interactions
of Hydrogen and Helium Isotopes in Si, Ge, NaI, CsI
Crystals

The reaction losses of $p, d, t, {}^3\text{He}$ and ${}^4\text{He}$ nuclei in Si, Ge, NaI and CsI crystals in the energy region from 1 to 500 MeV are calculated and compared with known experimental data.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1984