

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

54.91/82

151
/41-82

P16-82-629

В.И.Цовбун

АППРОКСИМАЦИЯ
ДВОЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ
ОБРАЗОВАНИЯ НЕЙТРОНОВ
В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ
ПРИ ЭНЕРГИИ ДО 100 МэВ/нуклон

Направлено на VIII Всесоюзное совещание
по ускорителям заряженных частиц
/Протвино, октябрь 1982 г./

1982

Целью аппроксимации является получение исходных данных для вычисления дозы до и за защитой ускорителей тяжелых ионов. Критерием приемлемости может служить достоверность оценки эквивалентной дозы нейтронов в пределах фактора 2-3.

При выводе аппроксимирующего выражения будем рассматривать максимально упрощенную картину взаимодействия налетающего иона с ядром мишени. Сечение взаимодействия примем равным геометрическому:

$$\sigma = \pi r_0^2 \cdot A_{\max}^{2/3}$$

где: $r_0 = 1,4 \cdot 10^{-13}$ см, $A_{\max} = \max\{A_i, A_t\}$, A_i - атомный вес иона, A_t - атомный вес ядра мишени. Положим, что соударения иона и ядра мишени ведут к образованию компаунда, который испускает только нейтроны, а другими процессами можно пренебречь.

Энергия возбуждения компаунда составит

$$E^* = \frac{A_t}{A_i + A_t} \cdot E - \Delta M,$$

где E - энергия налетающего иона /МэВ/; ΔM - дефект массы для компаунда ^{1,2/}.

Температура компаунда $T = \sqrt{10 \cdot E^* / A}$ /МэВ/ соответствует температуре ферми-газа частиц; $A = A_i + A_t$.

Энергия связи нейтрона B_n при испарении из компаунда может быть взята из ^{1/}.

Будем полагать, что энергетическое распределение нейтронов, вылетающих из компаунда, описывается распределением Максвелла со средней энергией нейтронов $2T$. Отсюда средняя множественность нейтронов на одно рассматриваемое событие

$$n = \frac{E^*}{B_n + 2T}.$$

Сечение образования нейтронов в системе центра масс /СЦМ/:

$$\frac{d^2\sigma(\epsilon)}{d\epsilon \cdot d\Omega} = \frac{\sigma \cdot n \cdot \epsilon}{4\pi T^2} \cdot e^{-\epsilon/T}.$$

Переход в лабораторную систему координат /ЛС/ дает искомое выражение для аппроксимации двойных дифференциальных сечений.

2

Энергия движения компаунда и СЦМ в единицах МэВ/нуклон

$$E_0 = \frac{A_i^2}{(A_i + A_t)^2} \cdot E_i.$$

Энергия нейтрона, выраженная через скорость, $\epsilon = \frac{v^2}{2}$ /масса нейтрона принята равной единице/. Скорость частицы, вылетающей из компаунда, в ЛС выражается через скорость движения компаунда \vec{v}_0 и скорость частицы в СЦМ \vec{v} : $\vec{v} = \vec{v}_L + \vec{v}_0$ или $v \cdot \cos\theta = v_L \cdot \cos\theta_L + v_0$ и $v_L \cdot \sin\theta_L = v \cdot \sin\theta$, где θ и θ_L - углы вылета в СЦМ и ЛС соответственно. Отсюда

$$\cos\theta = \frac{\sqrt{E_L} \cdot \cos\theta_L + \sqrt{E_0}}{\sqrt{\epsilon}}; \epsilon = E_L + E_0 - 2\sqrt{E_L \cdot E_0} \cdot \cos\theta_L.$$

Если обозначить $x = \cos\theta$ и $x_L = \cos\theta_L$, принимая во внимание, что азимутальные углы обеих систем одинаковы, то переход

$$\frac{d^2\sigma}{dE_L \cdot d\Omega_L} \cdot dE_L \cdot d\Omega_L = \frac{d^2\sigma}{d\epsilon \cdot d\Omega} \cdot d\epsilon \cdot d\Omega$$

сводится к вычислению якобиана ^{13/}

$$dx \cdot d\epsilon = \begin{vmatrix} \frac{dx}{dx_L} & \frac{dx}{dE_L} \\ \frac{d\epsilon}{dx_L} & \frac{d\epsilon}{dE_L} \end{vmatrix} \cdot dx_L \cdot dE_L.$$

Искомое выражение для двойных дифференциальных сечений в ЛС:

$$\frac{d^2\sigma}{dE_L \cdot d\Omega_L} \cdot dE_L \cdot d\Omega_L = \frac{\sigma \cdot n \cdot \sqrt{E_L(E_L + E_0 - 2\sqrt{E_L \cdot E_0} \cdot \cos\theta_L)}}{4\pi T^2} \cdot e^{-\frac{E_L + E_0 - 2\sqrt{E_L \cdot E_0} \cdot \cos\theta_L}{T}} \cdot x \cdot dx_L \cdot dE_L.$$

В практических вычислениях следует иметь в виду, что, как правило, $\Delta M \ll E^*$, а энергия связи нейтрона $B_n = 12+1$ для большого числа комбинаций ионов и мишеней.

Мощность эквивалентной дозы нейтронов, вылетающих под углом θ_L из толстой мишени, бомбардируемой ионами с энергией E

$$P(\theta_L, E) = \frac{f(E, \theta_L) \cdot J}{R^2} \cdot \int_{E_c}^E \int_0^\infty \frac{d^2\sigma(E_L, \theta_L, E')}{dE_L \cdot d\Omega_L} \cdot d(E_L) dE_L \frac{1}{dE'/dx} \cdot dE',$$

где: J - число ионов, падающих на мишень в единицу времени; R - расстояние до мишени, см; $d(E_L)$ - удельная эквивалентная доза нейтронов ^{4/}; dE'/dx - ионизационные потери ионов, которые рассматривались программой ^{5/}; $f(E, \theta_L)$ - коэффициент коррекции; E_c - энергия кулоновского барьера ^{2/}

$$E_c = \frac{0,96 \cdot z_i \cdot z_t}{A_i^{1/3} + A_t^{1/3}} \cdot (1 + \frac{A_i}{A_t}).$$

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ

ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

БИБЛИОТЕКА

На рис.1 представлены результаты сравнения компиляции экспериментальных данных^{16/} с расчетами мощностей доз нейтронов, вылетающих под углом 90° на расстоянии 1 м от железной мишени, которая бомбардируется потоком ионов ¹⁶O в количестве 6,25·10⁹ ион/с. Коррекция в расчетах не производилась.

На рис.2 сравнивается форма углового распределения эквивалентной дозы нейтронов вблизи урановой мишени, бомбардируемой ионами U с энергией 9 МэВ/нуклон^{17/}, и угловое распределение, полученное с помощью аппроксимации /пунктир/. Кривые нормированы при 90°.

Сравнение дифференциальных сечений производится с помощью функционала

$$D = \int_0^{\infty} B(E) \cdot \frac{d^2\sigma(E, \theta)}{dE \cdot d\Omega} \cdot d(E) \exp(-x/\lambda(E)) \cdot dE,$$

где $\lambda(E)$ - длина ослабления эквивалентной дозы в обычном бетоне^{18/}, x - толщина защиты, $B(E)$ - фактор накопления дозы нейтронов. Критерием согласия является отношение функционала для аппроксимационного сечения к функционалу со сравниваемым сечением $C = D_a/D$. На рис.3 сравниваются аппроксимация и сечения из работ^{9-11/}. Сплошные линии указывают кратности ослабления нейтронов в обычном бетоне, для которых $0,33 \leq C \leq 3$, а пунктирные - $0,25 \leq C \leq 4$. Аппроксимация рассчитывалась для углов θ_a . Угол θ обозначает угол или диапазон углов для соответствующего сечения из литературы. Следует заметить, что $C < 1$ лишь для углов $\leq 20^\circ$, для других углов аппроксимация переоценивает дозовый функционал.

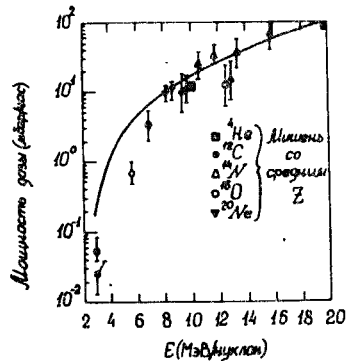


Рис.1

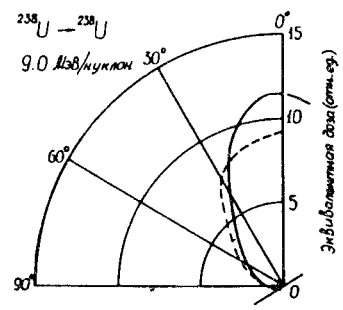
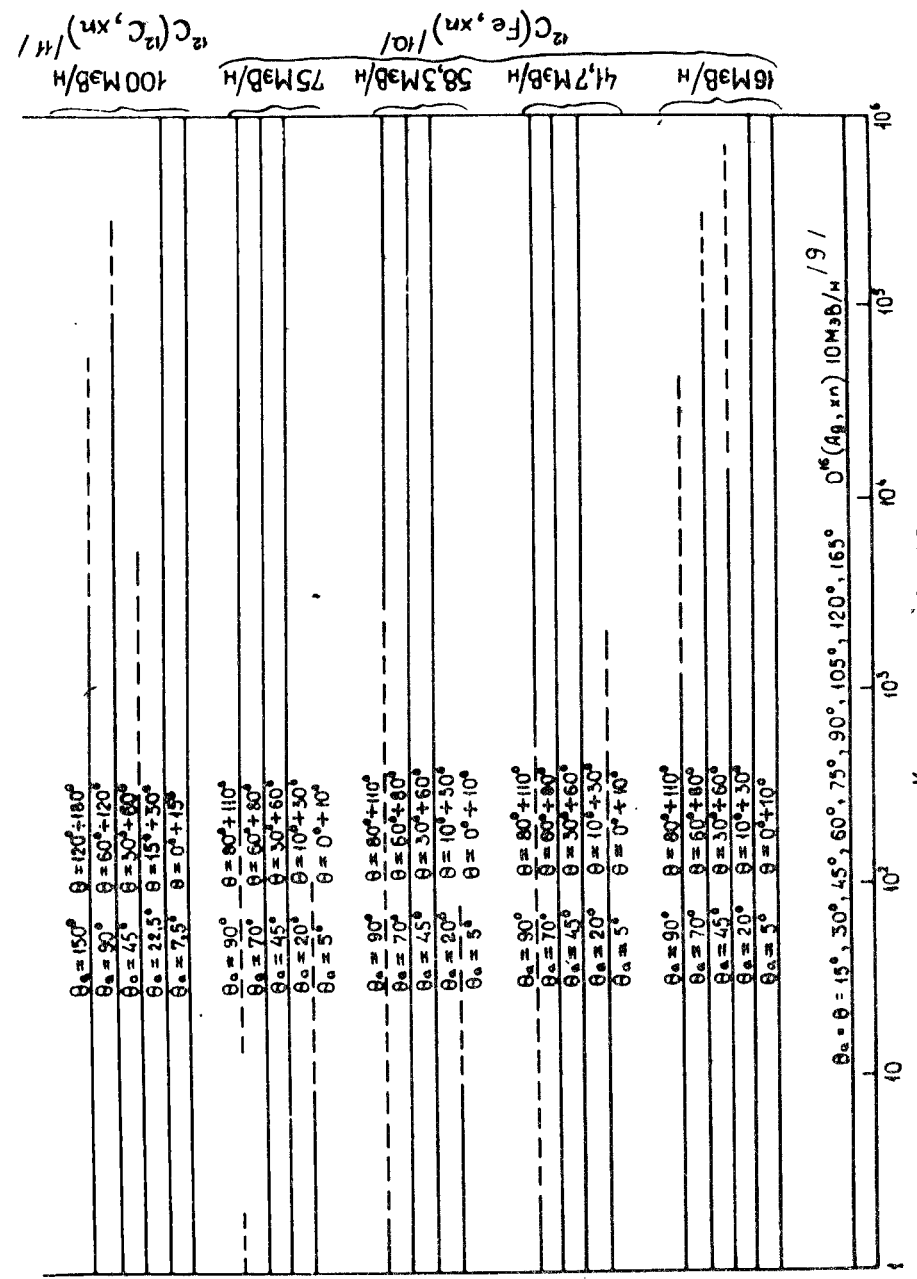


Рис.2



Кратность ослабления
Рис.3

Результаты сравнений показывают, что аппроксимация пригодна для описания дозы нейтронов до и за бетонной защитой тяжелоионных ускорителей в широком диапазоне энергий, сортов ионов и материалов мишеней. При взаимодействии легкого иона с массивным

ядром мишени применение аппроксимации для углов 20° и менее и энергий больше 10 МэВ/н может привести к неприемлемой недооценке эквивалентной дозы. В условиях недостатка информации, аппроксимацию следует использовать без коррекции, $f(E, \theta_L) = 1$. Имеющаяся информация позволяет ввести коррекцию в диапазоне энергий менее 10 МэВ/н. Предлагается ввести ее в зависимости от энергии иона над кулоновским барьером

$$E_b = \frac{E - E_c}{A_i}$$

$E_b, \text{МэВ/н}$	0	1	2	3	4	5	6
$f(E, \theta_L)$	1	0,25	0,2	0,18	0,25	0,55	1

В заключение автор выражает глубокую признательность А.Р.Крылову и М.М.Комочкову за полезные дискуссии и помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Myers W.D. et al. UCRL-11980, Berkeley, 1965.
2. Rindi A. LBL-4212, Berkeley, 1975.
3. Бюклинг Е., Каянти К. Кинематика элементарных частиц. "Мир", М., 1975.
4. Нормы радиационной безопасности НРБ-76 и основные санитарные правила ОСП-72/80. Энергоиздат, М., 1981.
5. Steward P.G. UCRL-18127, Berkeley, 1968.
6. Ohnesorge W.F. et al. Health Phys., 1980, vol.39, No.4, pp.633-636.
7. Festag J.G. In: Proc. of the 5th Congress of Int. Radiat. Protect. Society on Rad.Protect., Jerusalem, March, 1980. Pergamon Press, 1980, pp.743-746.
8. Комочков М.М. ОИЯИ, Р16-7335, Дубна, 1973.
9. Simon W.G., Ahrens S.T. Phys.Rev.C, 1970, vol.2, No.4, pp.1292-1303.
10. Bertini H.W., Santoro R.T., Hermann O.W. Phys.Rev.C, 1976, vol.14, No.2, pp.590-595.
11. Gabriel T.A. et al. Nucl.Sci. Eng., 1974, vol.53, No.3, pp.323-326; ORNL-TM334, Oak Ridge, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 августа 1982 года.

Цовбун В.И.

Р16-82-629

Аппроксимация двойных дифференциальных сечений образования нейтронов в реакциях с тяжелыми ионами при энергии до 100 МэВ/нуклон

Предложено приближенное выражение для сечения образования нейтронов в реакциях с тяжелыми ионами. При сравнении аппроксимации с известными данными за критерий согласия принято отношение функционалов, описывающих дозу нейтронов за бетонной защитой, для сравниваемых сечений. Определена обширная область энергий ионов, углов вылета нейтронов, сортов ионов и материалов мишени, для которых доза нейтронов за защитой описывается с точностью 2-3.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Tsovbnun V.I.

Р16-82-629

Neutron Production Double Differential Cross Section Approximation in Heavy Ion Reactions for Energies up to 100 MeV/Nucleon

Approximate expression for double differential cross section of neutron production in heavy ion reactions is suggested. The ratio of functions which describe the neutron dose equivalent behind the shielding for the cross sections compared was used as an agreement criterion. A wide range of ion energies, angles of neutron emission, sorts of ions and target materials is established for which neutron dose equivalent is described within the 2-3 factor accuracy.

The investigation has been performed at the Department of Radiation Safety and Radiation Researches, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 1982

Перевод О.С.Виноградовой.