

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P10-86-381

Н.Л.Горшкова, К.Г.Денисенко*, Ю.А.Мурин*

**ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОПРАВОК
НА ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ
К СПЕКТРАМ ПРОДУКТОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ**

* Радиевый институт им.В.Г.Хлопина, Ленинград

1986

В эксперименте, где производится спектрометрия заряженных ионов и используются мишени и фильтры конечной толщины, возникает задача введения поправок на ионизационные потери регистрируемых продуктов. Ее решение особенно важно, когда использование тонких мишеней затруднено (например, в случае малых сечений исследуемых процессов), а регистрируемые ионы имеют большой заряд. Примерами задач такого рода могут служить фрагментация, скалывание и деление ядер (см., например, обзор^{/1/}, а также исследование новых видов распадов ядер^{/2/}).

В данной работе рассматривается вычисление ионизационных энергетических поправок для ядер-фрагментов, рождающихся в протон- и ядро-ядерных взаимодействиях. Энергия исследуемых продуктов находится в диапазоне от 1 до 20 МэВ/нуклон, а их заряд — от 2 до 15 единиц заряда. В этом случае влияние энергетических потерь на спектры фрагментов достаточно велико. Так, при торможении в золотой фольге толщиной 4 мкм ядро $^{20}_{10}\text{Ne}$ теряет 57% своей энергии при начальной энергии 46 МэВ. На рис.1 представлен спектр ядер углерода, рождающихся в реакции $^4\text{He} + \text{Au}$ при $E_{^4\text{He}} = 7,7$ ГэВ, и тот же спектр после внесения поправок на торможение в мишени толщиной 4 мкм. Видно, что поправки приводят к значительному нелинейному изменению (а не только сдвигу) спектра исследуемого фрагмента. Для более тонких мишеней искажения не столь значительны, хотя и в этом случае они составляют в мягкой части спектра 20% для ядер $^{16}_8\text{O}$ при начальной энергии 15 МэВ и толщине золотой мишени 0,6 мкм.

При регистрации заряженных частиц с помощью телескопов полупроводниковых детекторов (см., например, ^{/3/}) необходимо экранировать первый детектор от высокочастотных наводок поля

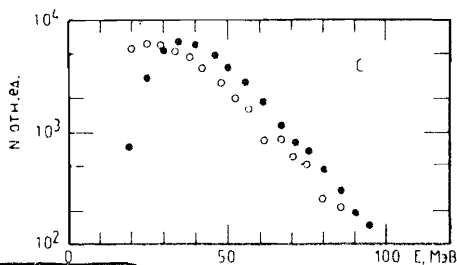


Рис.1. Дифференциальный энергетический спектр $^{12}_7\text{C}$ из реакции $^4\text{He} + \text{Au} \rightarrow ^{12}_7\text{C} + \text{X}$, $E_{^4\text{He}} = 7,7$ ГэВ: о — до внесения поправок на торможение в мишени толщиной 4 мкм, ● — после внесения поправок.

ускорителя и паров масла с помощью алюминиевого или полиэтиленового экрана толщиной несколько мкм. Эти поправки не приводят к значительным искажениям спектров фрагментов, а сдвигают их в более мягкую часть.

В экспериментах, где абсолютное мониторирование производится путем использования двухслойных мишеней (например, дейтерированный полиэтилен + исследуемое вещество), необходимо также вносить поправки на замедление исследуемых ядер-продуктов в дейтерированном полиэтилене.

Таким образом, задача введения поправок на ионизационные потери при регистрации низкоэнергетических многозарядных ионов является очень важной для получения их энергетических спектров.

Алгоритм введения поправок состоит в следующем. Для каждого значения E энергии регистрируемого в эксперименте спектра вычисляется значение энергии E' до прохождения тормозящего слоя. Ширина канала результирующего спектра $\Delta E'$ (т.е. истинного спектра исходных ионов) рассчитывается с учетом конечной ширины канала исходного спектра ΔE и, следовательно, нелинейного ее изменения. После этого число частиц N' в канале выходного спектра определяется из соотношения $N' = (\Delta E / \Delta E') N$, где N — число частиц в соответствующем канале входного спектра.

Вычисление любых величин, связанных с введением ионизационных поправок, основано на знании величины пробегов заряженных частиц в веществе. Несмотря на наличие ряда теорий, описывающих взаимодействие заряженных частиц с веществом (например, известная формула Бете), задача определения пробегов при низких энергиях частиц (порядка 1 МэВ/нуклон для частиц с зарядом свыше 5 единиц) продолжает оставаться полуэмпирической. Существует несколько таблиц пробегов и тормозных способностей ионов в различных веществах. Нами были использованы хорошо известные таблицы Нортклиффа и Шиллинга^{4/}.

Табличные данные зависимости пробега от энергии хорошо описываются формулой

$$R = (A_1 \cdot X^{A_2} + A_3 - A_4 e^{-A_5 X} - A_6 e^{-A_7 X}) \cdot \frac{M}{Z^2}, \quad (1)$$

где $X = E/M$, E — энергия иона, M — его массовое, а Z — зарядовое число. Коэффициенты A_i определяются для каждого Z . Полученные значения параметров A_i приведены в таблице.

Рис.2 иллюстрирует качество описания формулой (1) табличных значений функции $R(E)$ для $^{14}_7N$. Видно, что во всем диапазоне энергий формула (1) хорошо описывает имеющиеся данные.

Значения параметров кривой (1), описывающей зависимость пробегов ионов от энергии в различных веществах

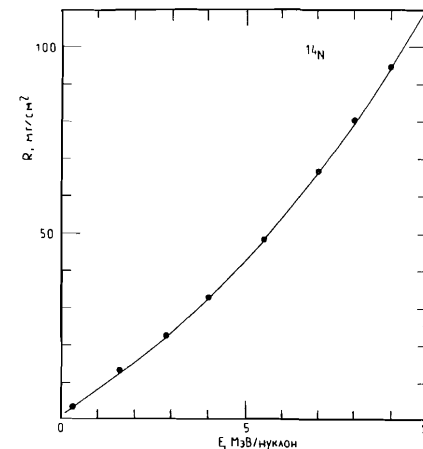
Вещество	Заряд иона	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
$(CH_2)_n$	1	17.14	1.86	3.45	2.93	6.03	0.041	67.09
	2	17.36	1.85	5.37	4.52	5.92	0.69	52.56
	3	18.50	1.82	8.71	7.30	4.69	1.17	40.59
	4	19.52	1.80	14.01	11.39	3.04	2.31	28.96
	5	21.14	1.77	18.51	15.10	2.82	3.07	26.60
	6	22.54	1.74	23.07	17.56	2.34	5.04	20.19
	7	24.20	1.72	25.91	19.38	2.49	5.99	19.04
	8	26.78	1.69	28.11	21.42	3.04	6.36	23.22
	9	29.90	1.65	31.56	22.81	3.11	8.27	19.84
	10	32.02	1.63	37.89	26.19	2.72	11.78	17.65
	11	35.45	1.61	41.06	29.25	3.11	11.33	18.72
	12	36.77	1.61	49.68	32.29	2.30	16.39	14.08
	13	40.15	1.59	53.01	37.52	2.78	15.05	17.66
	14	42.41	1.58	59.52	41.40	2.54	17.66	16.68
	15	45.21	1.56	65.04	45.64	2.55	19.01	16.86
Майлар	1	14.11	1.83	3.64	3.05	3.84	0.47	51.15
	2	14.92	1.80	4.22	3.54	6.59	0.54	55.64
	3	15.07	1.78	7.04	5.67	4.68	1.09	35.87
	4	16.8	1.76	11.63	9.22	2.91	2.13	26.56
	5	17.5	1.74	16.98	13.33	2.18	3.27	20.81
	6	18.6	1.72	21.73	16.96	1.72	5.07	17.18
	7	20.1	1.69	23.73	17.10	1.87	6.13	16.46
	8	22.1	1.66	26.02	18.1	2.070	7.44	16.13
	9	22.2	1.67	37.77	52.2	1.083	11.9	12.17
	10	27.7	1.59	31.31	20.3	2.505	10.6	16.11
	11	29.6	1.58	36.5	23.9	2.348	12.08	15.61
	12	31.39	1.57	41.97	27.71	2.21	13.8	15.4
	13	35.25	1.53	43.76	29.12	2.55	14.2	16.1
	14	34.55	1.50	35.14	36.11	1.78	18.5	13.8
	15	37.18	1.53	58.34	39.06	1.95	18.83	14.69
Al	1	11.65	1.74	3.67	3.05	1.53	0.47	34.60
	2	11.75	1.73	4.89	3.91	1.06	0.79	29.28
	3	11.81	1.73	9.14	7.82	1.54	1.10	30.06
	4	11.41	1.75	16.94	15.33	1.13	1.38	32.06
	5	11.44	1.75	23.72	21.72	1.04	1.72	29.83
	6	12.13	1.72	28.11	25.36	1.01	2.40	25.97
	7	13.18	1.69	30.18	26.66	1.06	8.01	20.87

Al	8	15.07	1.65	29.90	25.74	1.28	3.70	21.50
	9	16.38	1.62	34.51	28.98	1.21	4.91	17.93
	10	18.100	1.57	34.75	28.55	1.46	5.72	19.70
	11	20.81	1.56	38.18	31.51	1.55	6.21	20.05
	12	22.11	1.54	42.97	35.74	1.56	6.74	20.35
	13	23.56	1.53	47.48	39.78	1.58	7.29	21.04
	14	25.01	1.52	52.33	43.81	1.57	8.07	20.27
	15	26.56	1.51	56.100	47.82	1.57	8.76	20.09

Si	1	12.34	1.77	7.52	6.84	0.87	0.52	39.49
	2	12.33	1.77	8.64	7.54	1.21	0.93	32.53
	3	12.38	1.77	13.88	12.40	1.16	1.30	33.48
	4	12.35	1.77	22.40	20.58	1.01	1.65	35.80
	5	12.37	1.77	30.24	28.01	0.97	2.06	34.81
	6	12.43	1.77	38.84	35.75	0.86	2.90	30.21
	7	12.56	1.77	45.53	41.70	0.83	3.62	27.08
	8	12.85	1.77	52.94	48.08	0.81	4.68	24.84
	9	12.92	1.77	66.10	59.87	0.72	6.10	22.65
	10	13.18	1.77	80.10	72.22	0.65	7.80	20.85
	11	13.85	1.77	88.71	80.05	0.68	8.69	21.02
	12	14.16	1.77	100.79	91.13	0.67	9.77	20.99
	13	14.68	1.77	109.32	98.80	0.69	10.78	21.17
	14	15.08	1.77	120.68	109.07	0.69	11.93	21.03
	15	15.49	1.77	132.46	119.84	0.68	13.13	20.79
	16	15.89	1.77	144.77	130.99	0.68	14.41	20.56
	17	16.30	1.77	157.52	142.58	0.67	15.74	20.25
	18	16.70	1.77	170.74	154.58	0.66	17.15	19.96

Au	1	4.72	1.59	2.20	1.76	1.47	0.35	28.26
	2	4.77	1.58	2.92	2.13	1.84	0.63	24.98
	3	4.89	1.57	4.60	3.58	1.89	0.82	28.01
	4	4.70	1.59	7.86	6.50	1.42	1.11	25.91
	5	4.75	1.59	10.59	8.87	1.33	1.42	23.77
	6	4.99	1.57	12.77	10.46	1.25	1.94	21.68
	7	5.48	1.54	13.74	10.93	1.33	2.39	19.54
	8	6.08	1.51	14.87	11.50	1.44	2.93	19.09
	9	6.78	1.47	16.48	12.37	1.46	3.64	18.05
	10	7.55	1.44	18.23	13.28	1.50	4.44	17.29
	11	8.36	1.42	19.77	14.50	1.63	4.77	17.56
	12	8.94	1.40	21.98	16.24	1.67	5.22	17.74
	13	9.53	1.39	24.18	17.99	1.68	5.69	17.57
	14	10.16	1.38	26.44	19.73	1.70	6.19	17.49
	15	10.75	1.37	28.80	21.55	1.68	6.75	16.97

Рис.2. Табличные данные из [4] по зависимости пробега от энергии для $^{14}_7\text{N}$ (●) и аппроксимирующая кривая вида (1).



ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОДПРОГРАММ ПАКЕТА

Основными подпрограммами пакета являются подпрограммы WAY, ENINIT, DFEO, TARGET.

Подпрограмма-функция WAY

Назначение подпрограммы:

Определение величины полного пробега R иона с зарядом Z и массовым числом M в данном веществе по формуле (1).

Ф о р м а о б р а щ е н и я :

$$R = \text{WAY}(E).$$

Назначение параметров:

E — энергия иона (в МэВ),

R — пробег иона (в мкм).

Т р е б у е м ы е п о д п р о г р а м м ы : отсутствуют.

О б щ и е б л о к и :

/ION/ IM, IZ, где IM — массовое число иона,

IZ — зарядовое число иона.

/ELM/ LEM, где LEM — тип тормозящего вещества,

LEM = 1 для майлара,

2 для алюминия,

3 для кремния,

4 для золота,

5 для $(\text{CH}_2)_n$.

Я з ы к : Фортран.

Подпрограмма ENINIT

Назначение подпрограммы:

Вычисление начальной энергии иона по известной толщине тормозящего слоя и энергии после прохождения тормозящего слоя.

Форма обращения:

CALL ENINIT (E, RNG, EO)

Назначение параметров:

E — величина энергии иона после прохождения тормозящего слоя (в МэВ),

RNG — толщина тормозящего слоя (в мкм),

EO — искомая начальная энергия иона до прохождения им тормозящего слоя (в МэВ).

Требуемые подпрограммы: WAY.

Общие блоки: отсутствуют.

Язык: Фортран.

Подпрограмма DFEO

Назначение подпрограммы:

Определение энергии иона, при которой он полностью останавливается в слое вещества толщиной RNG.

Форма обращения:

CALL DFEO(EO, RNG)

Назначение параметров:

EO — величина энергии иона (в МэВ), при которой наступает его полная остановка в слое вещества.

RNG — толщина тормозящего слоя (в мкм).

Требуемые подпрограммы: WAY.

Общие блоки: отсутствуют.

Язык: Фортран.

Все эти подпрограммы (кроме WAY) используют итерационный алгоритм деления отрезка пополам. Точность его работы задается в каждой подпрограмме отдельно переменной EPS. Обычно достаточно выбрать $EPS = 0,01$ МэВ. Для правильной работы с этими модулями необходимо в вызывающей программе описать общие блоки /ION/ и /ELM/ и присвоить соответствующие значения переменным из этих общих блоков.

Подпрограмма TARGET

Подпрограмма TARGET предназначена для введения ионизационных поправок в энергетические спектры продуктов ядерных реакций, полученные в эксперименте. Основным предположением, использованным в алгоритме этой подпрограммы, является то, что распределение вероятности рождения иона по толщине мишени равномерное. Поэтому, производя разбиение мишени по ее толщине на различное число полосок, мы должны учитывать тот факт, что разные ионы после своего рождения проходят разную толщину вещества. Очевидно, что наиболее точные поправки могут быть получены при бесконечно большом числе разбиений. Однако, начиная с некоторого момента, при дальнейшем увеличении числа разбиений

результатирующий спектр меняется незначительно, и, следовательно, имеется возможность выбрать оптимальное число элементарных полосок. Обычно для спектров ионов с $Z = 10$ единиц заряда и начальной энергией ~ 2 МэВ/нуклон достаточно 10-15 разбиений.

Назначение подпрограммы:

Учет ионизационных поправок к спектрам ионов после прохождения ими вещества мишени.

Форма обращения:

CALL TARGET (NTP, WDT)

Назначение параметров:

NTP — число разбиений мишени на элементарные полоски.

WDT — толщина мишени (в мкм).

Требуемые подпрограммы: ENINIT, WAY.

Общие блоки:

/FDS/ XF(100), YF(100), NBF, BWDF

/IDS/XI(200), YI(200), NBI, BWDI

XF — массив, содержащий значения энергии входной гистограммы,

YF — массив, содержащий количество частиц в соответствующем канале входной гистограммы,

NBF — число каналов во входной гистограмме,

BWDF — ширина канала входной гистограммы.

XI, YI, NBI и BWDI имеют аналогичный смысл, но для выходной гистограммы.

Язык: Фортран.

Для пользования подпрограммы должны быть описаны общие блоки /ION/ и /ELM/ (см. описание подпрограммы WAY).

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДПРОГРАММ

Описанный пакет используется для обработки энергетических спектров продуктов фрагментации и расчета параметров детектирующей системы на установке "Спектрометр ядер отдачи" ЛВЭ ОИЯИ. Он адаптирован на ЭВМ ЕС-1055М и СМ-4 (СМ-3). На ЭВМ типа СМ работа может вестись в интерактивном режиме с одновременным контролем результатов по цветному видеомонитору (программный интерфейс также разработан авторами).

ЛИТЕРАТУРА

1. Hufner J., Phys. Rep., 1985, 125, p.129.
2. Ботвина А.С., Ильинов А.С., Мишустин И.Н. Письма в ЖЭТФ, 1985, т.42, вып.11, с.462.
3. Абашидзе Л.И. и др. ОИЯИ, 1-83-185, Дубна, 1983.
4. Northcliffe L.C., Schilling R.F. Nucl. Data Tables, 1970, 7, p.233.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 июня 1986 года.

ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Индекс

Тематика

1. Экспериментальная физика высоких энергий
2. Теоретическая физика высоких энергий
3. Экспериментальная нейтронная физика
4. Теоретическая физика низких энергий
5. Математика
6. Ядерная спектроскопия и радиохимия
7. Физика тяжелых ионов
8. Криогеника
9. Ускорители
10. Автоматизация обработки экспериментальных данных
11. Вычислительная математика и техника
12. Химия
13. Техника физического эксперимента
14. Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15. Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16. Дозиметрия и физика защиты
17. Теория конденсированного состояния
18. Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19. Биофизика

Горшкова Н.Л., Денисенко К.Г., Мури́н Ю.А.

P10-86-381

Программы для расчета поправок на ионизационные потери к спектрам продуктов ядерных реакций

Показано, что поправки на ионизационные потери приводят не только к сдвигу, но к значительному нелинейному изменению энергетических спектров фрагментов с $Z=2-15$ и энергией от 1 до 20 МэВ/нуклон, рождающихся в реакциях $p + Au$ и ${}^4\text{He} + Au$. Характерное значение потерь энергии для рассмотренного диапазона зарядов, энергий, толщин и сорта поглотителей ($(\text{CH}_2)_n$, Al, Si и Au) составляет $\sim 20\%$. Создан пакет программ для внесения поправок на ионизационные потери, адаптированный на ЭВМ ЕС-1055М и СМ-4 и применяемый для обработки экспериментальных данных по фрагментации ядер на установке СЯО (спектрометр ядер отдачи) ЛВЭ ОИЯИ.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод Л.Н.Барабаш

Gorshkova N.L., Denisenko K.G., Murin Yu.A.

P10-86-381

The Programs to Calculate the Energy Loss Correction to the Spectra of Nuclear Reactions Products

It is shown that ionization corrections lead not only to an energy shift but also to a significant nonlinear transformation of the spectra of fragments with $Z=2-15$ produced in $p + Au$ and ${}^4\text{He} + Au$ collisions with energies of 1-20 MeV per nucleon. The characteristic value of energy losses for the considered range of charges, energies, target widths and materials (mylar, $(\text{CH}_2)_n$, Al, Si and Au) is of the order of 20%. This package of programs adapted for use on ЕС-1055M and PDP-11/34 (СМ-4) computers is applied for the processing of fragmentation data collected by the Nuclear Recoil Spectrometer at the Laboratory of High Energies, JINR.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986