

РЕГИСТРАЦИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ
НА ЯДРАХ ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 4,5 Гэв

В. Н. АРУТЮНЯН, Г. В. БАДАЛЯН, Д. М. БЕГЛАРЯН, К. БОРЧЕА*, А. БУЦЭ*,
Т. А. ВАРДАНЯН, М. А. ГАРЗОЯН, Д. ДОРЧОМАН*, Г. Г. ЗОГРАБЯН,
Р. А. КАРАПЕТЯН, Г. Е. МАРКАРЯН, Г. И. МЕЛИКОВ, Я. Д. НЕРСЕСЯН,
О. И. ПАСОЯН, М. ПЕТРАШКУ*, М. ПЕТРОВИЧ*, В. С. ПОГОСОВ,
В. СИМИОН*, С. А. ШАТИЕВ

На внутреннем пучке Ереванского синхротрона на базе полупроводникового (dE/dx , E) телескопа создана экспериментальная установка «с-А» для регистрации и идентификации тяжелых частиц, образованных в тонких ядерных мишенях электронами больших энергий. Предварительные измерения, выполненные при энергии электронов 4,5 Гэв, показали образование наряду с протонами значительного количества дейтронов, тритонов и ядер гелия.

Образование тяжелых частиц — протонов, дейтронов, тритонов, ядер гелия — при взаимодействии электронов высоких энергий с атомными ядрами представляет большой интерес для многих аспектов ядерной физики.

Механизм образования этих частиц тесно связан со структурой ядра, существованием нуклонных ассоциаций в ядрах, природой масштабных инвариантных эффектов типа ядерного скейлинга и полускейлинга и т. д. [1—5]. Тем не менее эти процессы в настоящее время изучены недостаточно хорошо как теоретически, так и экспериментально, особенно при энергиях электронов выше 2 Гэв [6—11].

На Ереванском электронном синхротроне создана экспериментальная установка «с-А» для исследования инклюзивного электрообразования тяжелых частиц на ядрах в различных кинематических условиях [12]:

$$e + A \rightarrow p, d, t, He^3, He^4, \dots + \dots \quad (1)$$

Отличительной чертой этой установки является применение полупроводниковой (dE/dx , E) методики на внутреннем пучке электронного синхротрона большой энергии. Ниже приводятся описание установки и предварительные результаты обработки экспериментальных данных, полученных с помощью этой установки при облучении мишени электронами с энергией 4,5 Гэв.

1. Описание установки

Экспериментальная установка (рис. 1) расположена на внутреннем пучке синхротрона и едина с ним по вакууму. Она состоит из камеры рассеяния, куда вводится дистанционно управляемая многопозиционная ядерная мишень, и камеры детектирования, в которой располагается полупроводниковый (dE/dx , E) детекторный телескоп.

Мишенью служат тонкие металлические фольги толщиной в несколько микрон, закрепленные на «звездочке» под углом 45° к направлению

пучка и находящиеся в рабочем положении на расстоянии ~ 40 мм от равновесной орбиты ускорителя. В конце цикла ускорения электронный пучок сбрасывается на мишень с помощью локального возмущения орбиты (т. н. «бим-бамп» системы); из-за малой толщины фольги ($10^{-3} \div 10^{-4}$ лавинных единиц) осуществляется многократное прохождение пучка через мишень. Образованные в мишени тяжелые частицы попадают в камеру детектирования, регистрируются и идентифицируются полупроводниковым телескопом.

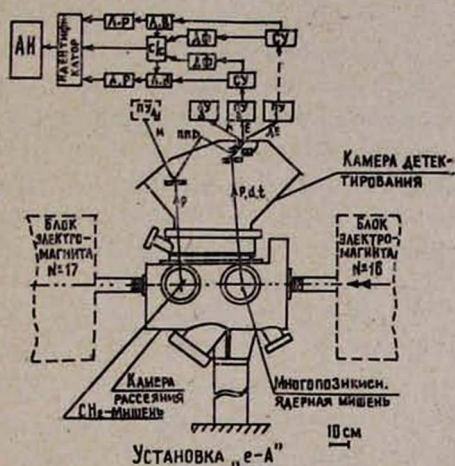


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Телескоп состоит из тонкого пролетного « dE/dx »-детектора удельных ионизационных потерь энергии и толстого « E »-детектора остаточной энергии частиц. Их сочетание позволяет определять массы частиц, останавливающихся в « E »-детекторе.

Во время первых серий измерений « dE/dx »-детектор представлял из себя кремниевый поверхностно-барьерный детектор толщиной ~ 200 мкм, а « E »-детектор — кремниевый поверхностно-барьерный детектор толщиной ~ 2 мм. Для исключения регистрации частиц, не останавливающихся в « E »-детекторе, предусмотрен, но пока еще не применен дополнительный полупроводниковый детектор в режиме антисовпадений (« A »-детектор). В этих условиях энергетический интервал регистрируемых протонов составлял $4,7 \div 18,5$ Мэв, дейтронов — $6,1 \div 25$ Мэв, тритонов — $7,3 \div 30$ Мэв, He^3 — $17 \div 65$ Мэв и He^4 — $19 \div 75$ Мэв. Телескоп располагался под углом $\sim 90^\circ$ к пучку электронов на расстоянии ~ 70 см от мишени. Для уменьшения фона телескоп был окружен свинцовой защитой.

С целью мониторингирования внутреннего электронного пучка в последующих измерениях в левой части камеры детектирования предусмотрен специальный полупроводниковый детектор для спектрометрии протонов отдачи от упругого ep -рассеяния электронов на дополнительной тонкой CH_2 -мишени, устанавливаемой в камере рассеяния.

Блок-схема спектрометрической и логической электроники приведена в верхней части рис. 1. Использовались стандартные блоки отечественной (предусилители ЦЭМ ОИЯИ) и американской (фирм ORTEC и CANBERRA) электроники.

Импульсы с детекторов усиливаются зарядочувствительными малошумящими предусилителями, расположенными непосредственно рядом с детекторами. Далее сигналы по кабелям (~ 100 м) передаются на измерительный пульт к спектрометрическим усилителям. Последние имеют как быстрый, так и спектрометрические выходы. С быстрых выходов ΔE - и E -импульсы через дискриминирующие-формирующие блоки подаются на схему совпадений. Режим совпадений настраивался с помощью временно-амплитудного конвертора. Со спектрометрических выходов сигналы подаются на линейные ворота, управляемые импульсом совпадений, а затем на расширители. Сформированные ΔE -, E -импульсы длительностью ~ 4 мксек вместе с сигналом совпадений подаются на функциональный преобразователь, т. е. идентификатор частиц, амплитуды выходных импульсов которого пропорциональны произведению массы частицы на квадрат ее заряда [13]:

$$MZ^2 \sim (E + \Delta E)^{1,73} - E^{1,73}. \quad (2)$$

Наряду с этим с идентификатора можно также вывести сигнал, пропорциональный суммарной потере энергии частицы в двух детекторах ($\Sigma E = \Delta E + E$).

В описываемой установке идентификатор был подключен к одномерному многоканальному анализатору «DIDAC-4000» для получения спектра масс частиц. Применение многоканального двухмерного анализатора, подключенного к двум выходам идентификатора, дало бы возможность получить энергетические спектры различных групп частиц.

Энергетическое разрешение детекторов определялось по α -радиоактивным линиям Pu^{238} (5,15 Мэв), Pu^{239} (5,5 Мэв) и Sr^{244} (5,8 Мэв) и составляло ~ 70 Кэв для тонкого детектора и ~ 80 Кэв для толстого детектора. Эти же α -линии использовались и для энергетической калибровки спектрометрических трактов. Линейность трактов проверялась зарядовым генератором точных амплитуд.

С целью оптимального размещения исследуемых типов частиц (значений $\propto MZ^2$) в рабочей области анализатора производилась т. н. «массовая калибровка». Она состояла в имитации актов прохождения частиц через детекторы с помощью раздвоенных импульсов от генератора точных амплитуд, подаваемых по регулируемым спектрометрическим трактам на ΔE -, E -входы идентификатора, с амплитудами, соответствующими расчетным значениям энерговыделений выбранных частиц заданной энергии в детекторах.

Перед рабочими измерениями регистрирующая-измерительная аппаратура предварительно была проверена на протонном и дейтронном пучках ($E_{\text{мкз}} = 15$ Мэв) «Тандем» — ускорителя Института физики и ядерной технологии в Бухаресте.

Набор информации во время пучковых измерений контролировался на дисплее анализатора, а по окончании сеанса измерений массив выводился на цифропечатающее устройство.

2. Результаты предварительных измерений и обработка спектров масс

На рис. 2—4 показан ряд экспериментальных спектров $N = f(MZ^2)$, полученных на анализаторе во время первых пучковых сеансов на легких (Be^9) и тяжелых (Au^{197}) ядрах (для последних представлены два спектра, измеренные в разных режимах регистрирующей электроники). Экспериментальные точки представляют сгруппированные по каналам анализатора частоты наблюдения различных значений MZ^2 (относительные единицы). Из рисунков видно, что правее резко выраженного протонного пика имеются заметные скопления дейтронов, а также более тяжелых частиц — трионов и ядер He^3 , He^4 .

Все группы частиц расположены на некоторой фоновой кривой, резко возрастающей слева (обрезание обусловлено пороговым дискриминированием). Фон обусловлен регистрацией более легких частиц — электронов, позитронов и мезонов, отсутствием антисовпадательного детектора и эффектом наложения импульсов.

Для исключения влияния фона на проведение количественного сравнения образования различных групп тяжелых частиц экспериментальные спектры на рис. 2—4 аппроксимировались выражением вида

$$F(n) = a_1 \exp[-a_2 n] + a_3 \exp[-a_4 n] + a_5 \exp\left[-\frac{(n-a_6)^2}{a_7}\right] + a_8 \exp\left[-\frac{(n-a_9)^2}{a_{10}}\right] + \dots, \quad (3)$$

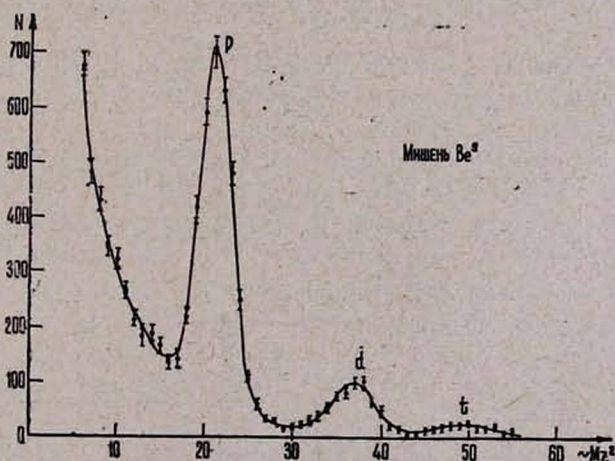


Рис. 2. Экспериментальный спектр $N=f(MZ^2)$, полученный на мишени Be^9 . Режим калибровки соответствовал регистрации трех частиц (p , d , t).

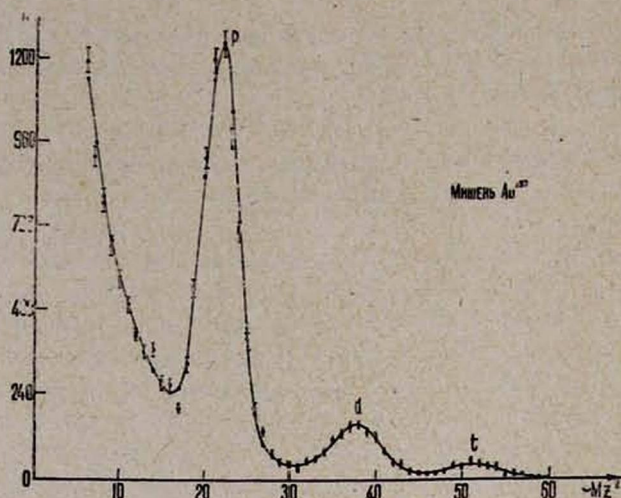


Рис. 3. Экспериментальный спектр $N=f(MZ^2)$, полученный на мишени Au^{197} . Режим калибровки соответствовал регистрации трех частиц (p , d , t).

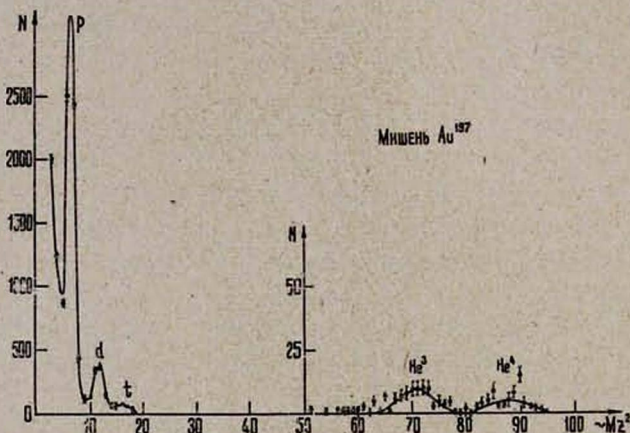


Рис. 4. Экспериментальный спектр $N=f(MZ^2)$, полученный на мишени Au^{197} . Режим калибровки соответствовал регистрации пяти частиц (p , d , t , He^3 , He^4).

где первые два экспоненциальных члена введены для описания фона, а остальные члены, которые имеют вид гауссовского распределения, введены для описания соответствующего вклада протонов, дейтронов и т. д. в исследуемый спектр. В выражении (3) n — номер группы каналов анализатора, $a_1, a_2, a_3, \dots$ — варьируемые параметры.

Фитирование проводилось минимизацией функционала

$$\chi^2 := \sum_n \left[\frac{N_n - F(n)}{\Delta N_n} \right]^2, \quad (4)$$

где ΔN_n — ошибка измерения экспериментальной точки N_n на ЭВМ БЭСМ-6. Минимизация осуществлялась методом линеаризации по программе FUMILI [14].

Результаты фитирования для спектров, представленных на рис. 2—4, приведены в табл. 1—3 и были использованы при построении соответствующих аппроксимирующих кривых, изображенных на тех же рисунках. Видно хорошее согласие между экспериментальными и расчетными распределениями ($\chi^2/\bar{\chi}^2 \lesssim 1$).

Таблица 1

Мишень Be^9

Ф о н				Протоны			Дейтроны			Тритоны		
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}
1351500	1,53	1247	0,14	653,0	21,2	6,6	91,2	37,0	10,6	22,0	49,6	19,9

 $\chi^2 = 64$ на 100 точек.

Таблица 2

Мишень Al^{197}

Ф о н				Протоны			Дейтроны			Тритоны		
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}
2815	0,22	756,3	0,1	1129	21,7	7,9	135,9	37,8	13,8	35,9	51,3	14,7

 $\chi^2 = 113$ на 100 точек.

Таблица 3

Мишень Al^{197}

Ф о н				Протоны			Дейтроны			Тритоны			He^3			He^4		
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}	α_{15}	α_{16}	α_{17}	α_{18}	α_{19}
8,936	0,5	0,7	0,005	2792	6,5	0,9	384	11,7	1,8	79,0	16,0	4,0	9,5	71,0	19,1	5,28	88,0	22,6

 $\chi^2 = 73$ на 100 точек.

Из данных, приведенных в таблицах, можно определить среднеквадратичные отклонения соответствующих гауссовских распределений и, следовательно, оценить относительные разрешения по массам (по MZ^2) частиц:

$$\sigma(p, d, t, He^3, He^4, \dots) = \sqrt{\frac{\alpha_7, 10, 13, 16, 19, \dots}{2}}. \quad (5)$$

Полученные значения этих разрешений приведены в табл. 4.

Таблица 4

Тип частиц	Относительные разрешения по массе, %	Тип частиц	Относительные разрешения по массе, %
Протон	≈ 10	Тритон	≈ 8
Дейтрон	≈ 8	Ядра гелия	≈ 5

THE REGISTRATION OF HEAVY PARTICLES
PRODUCTION ON NUCLEI WITH 4.5 GeV ELECTRONS

V. N. ARUTUNYAN, G. V. BADALYAN, D. M. BEGLARYAN, K. BORCEA,
A. BUCE, T. A. VARTANYAN, M. A. GARZOYAN, D. DORCIOMAN,
G. G. ZOGRABYAN, R. A. KARAPETYAN, G. E. MARKARYAN, G. I. MELIKOV,
Ya. D. NERSESSYAN, O. I. PASSOYAN, M. PETRASCU, M. PETROVICH,
V. S. POGOSOV, V. SIMION, S. A. SHATIEV

The experimental "e-A" setup based on a semiconductor (dE/dx , E) telescope has been constructed for the detection and identification of heavy particles produced in thin nuclear targets by electrons of the internal beam of the Yerevan Electron Synchrotron. The preliminary measurements performed with 4.5 GeV electrons show that besides the protons, a noticeable quantity of deuterons, tritons and helium nuclei are produced.