

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

13-85-535

А.В.Белозеров, К.Борча, З.Длоуглы, А.М.Калинин,
Р.Калпакчиева, Нгуен Хоай Тьяу, Ю.Э.Пенионжкевич,
Н.К.Скобелев

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАСС ЯДЕР,
ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ДВУХЧАСТИЧНЫХ РЕАКЦИЯХ
С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

1985

ВВЕДЕНИЕ

Определение границ нуклонной стабильности и измерение масс неизвестных ядер является актуальной задачей ядерной физики. Особенно интересны исследования в области нейтроноизбыточных легчайших элементов, где предсказания теории довольно неопределенны, и экспериментальные результаты в этой области являются ценным материалом для уточнения существующих представлений о структуре ядер. Применение пучков тяжелых ионов для получения новых неизвестных ядер и изучения их свойств, в частности, проведение прецизионных измерений масс ядер показало перспективность этого направления исследований^{/1-4/}.

Наиболее удобным способом определения масс ядер являются двухчастичные реакции, в которых масса исследуемого ядра определяется из величины Q реакции, приводящей к образованию двух конечных ядер в основном состоянии. Величина Q извлекается из измерений энергетического спектра сопряженного продукта известной массы. Наличие пиков в этом спектре свидетельствует об образовании конечных ядер в определенном энергетическом состоянии со временем жизни большим, чем время протекания реакции. Подобный подход становится принципиальным в случае определения нуклонной стабильности неизвестных ядер и изучения их виртуальных и квазистационарных состояний, когда регистрация самого изучаемого ядра невозможна.

Реакции, приводящие к образованию экзотических ядер, обладают следующими особенностями: большой отрицательной величиной Q -реакции /30-60 МэВ/, что определяет малую величину их поперечного сечения, и острой направленностью продуктов реакции в передние углы, где велико сечение упругого рассеяния. Эти обстоятельства создают серьезные трудности для изучения реакций с образованием экзотических ядер и накладывают жесткие условия на выбор экспериментальной установки для проведения исследований. Для таких экспериментов обычно используются магнитные анализаторы, которые позволяют очиститься от значительной части продуктов фоновых реакций и провести прецизионные измерения энергетических спектров^{/4-7/}.

Ускорители тяжелых ионов ЛЯР ОИЯИ благодаря высокой интенсивности пучков и широкому спектру ускоряемых ионов предоставляют исключительные возможности для изучения редких процессов образования экзотических ядер. С этой целью на ускорителе У-300 была создана установка на базе широкодиапазонного магнитного анализатора МСП-144^{/8/}.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Экспериментальная установка включает в себя магнитный анализатор МСП-144 со ступенчатыми полюсами, камеру рассеяния, коллимационную систему, детектор в фокальной плоскости магнитного анализатора /рис.1/, а также электронное обеспечение и мини-ЭВМ СМ-3, с помощью которой производится накопление и обработка информации.

Параметры магнитного анализатора приведены в табл.1.

Таблица 1

Энергетический диапазон	E_{\max} / E_{\min}	5,2
Дисперсия	$D(M)$	1,9
Горизонтальное увеличение	$M / \text{гор.}/$	0,3
Вертикальное увеличение	$M / \text{верт.}/$	2,7
Отношение дисперсии к увеличению	$D/M / \text{гор.}/$	6,3
Угол отклонения частицы	[град.]	110,7
$A \cdot E / q^2$	[МэВ]	80
Максимальный радиус	[м]	1,25
Телесный угол	[мср]	5
Энергетическое разрешение	$\Delta E/E$	$5 \cdot 10^{-4}$

Большой телесный угол и хорошее энергетическое разрешение позволяют использовать анализатор в экспериментах с малыми сечениями образования продуктов реакций и проводить прецизионные измерения энергетических спектров. Важными являются такие характеристики анализатора, как линейность фокальной плоскости по всей длине /1,5 м/, а также линейная зависимость дисперсии и разрешения от положения вдоль всей фокальной плоскости. Энергия частиц определялась по формуле:

$$E = k(Vx)^2 q^2 / A, \quad (1)$$

где E - энергия частицы [МэВ], V - значение магнитного поля в большом зазоре [Т], x - координата прихода частицы на фокальную плоскость [м], q - ионный заряд, A - масса [а.е.м], k - постоянный коэффициент.

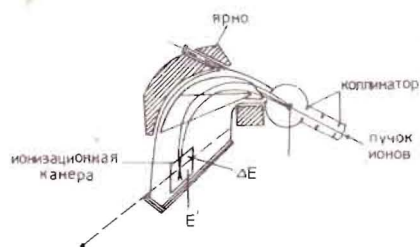


Рис.1. Экспериментальная установка.

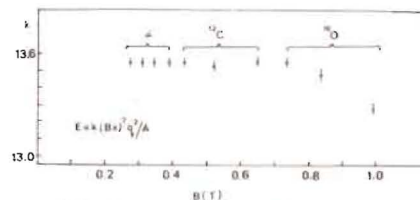


Рис.2. Результаты измерений величины K в зависимости от значения магнитного поля в большом зазоре анализатора.

Магнитное поле анализатора в большом зазоре измерялось стандартным магнитометром Ш-1-1 с точностью 0,01%, схема стабилизации тока магнита позволяла поддерживать стабильность магнитного поля на уровне 10^{-4} в течение многосуточных измерений. Калибровка анализатора вдоль фокальной плоскости и определение константы K проводились двумя полупроводниковыми детекторами, установленными в фокальной плоскости на расстоянии 0,5 м, калибровка производилась с помощью спектрометрического источника α -частиц ^{226}Ra , расположенного в фокусе анализатора. Из интенсивности счета α -частиц известной энергии на обоих детекторах, в зависимости от величины магнитного поля, определялись центры пиков для 4 измерений и путем несложных преобразований уточнялись координаты центров детекторов и извлекалась константа $K = 13,55 \pm 0,04$. Так как измерения соотношения полей в большом и малом зазорах анализатора показали небольшие отклонения от константы, начиная с $V \geq 0,8$, для этой области была проведена дополнительная калибровка анализатора на пучке ионов ^{129}Xe и ^{18}O циклотрона У-300. При этом регистрировались ядра отдачи $^{12}\text{C}^{8+,6+,4+}$ из тонкой /30 мг/см²/ углеродной мишени и ионов $^{16}\text{O}^{8+,7+,6+}$, рассеянных на тонкой золотой мишени. На рис.2 представлены результаты этих измерений.

Для регистрации продуктов реакций использовалась ионизационная камера с сеткой /рис.3/ /входное окно 120 x 15 мм²/, которая помещалась в приемную камеру анализатора. Анод камеры разделен на две части. Первый участок регистрирует потери энергии (ΔE), второй - остаточную энергию (E). В зазоре между пластинами анода находился пропорциональный счетчик с линией задержки для измерения координаты x вдоль фокальной плоскости. Нить счетчика золоченый вольфрам толщиной 30 мкм/ располагалась в фокальной плоскости спектрометра. Координата измерялась по разности времени прихода сигналов на концы линии задержки. Волновое сопротивление линии $\sim 1\text{кОм}$,

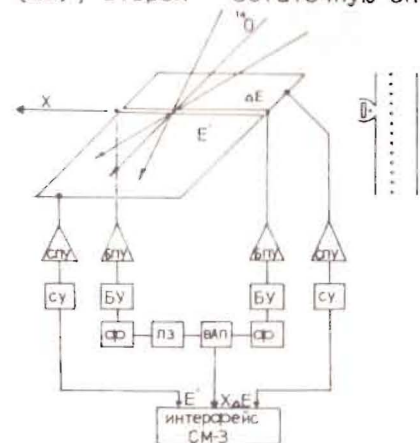


Рис.3. Ионизационная камера и блок-схема аналоговой электроники.

задержка - 1,5 нс/мм. Камера наполнялась парами пентана (C_5H_{12}) и изобутана (C_4H_{10}). Выбор газа определялся большими тормозными способностями этих газов при малом давлении, что, в свою очередь, позволяло применять тонкие окна для входного окна, что особенно важно при регистрации продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами. Эксперименты проводились при давлении газа до 300-350 мм рт.ст., что позволяло использовать лавсановые пленки толщиной - 2 мкм. Газовая система не имела протока газа, однако ухудшения разрешения не наблюдалось в течение 30-40 ч работы /время эксперимента/.

Камера испытывалась на пучке ионов ^{12}C с энергией 83 МэВ. Упругорассеянные на тонкой мишени из золота ионы ^{12}C регистрировались при давлении 220 мм рт.ст. Испытания дали следующие результаты: разрешения для $E = 2,1\%$ для $\Delta E = 3,2\%$, для $x = 0,7\text{мм}$. Разрешение для ΔE и E определялось, в основном, угловым разбросом ионов при попадании в ионизационную камеру $\pm 1,57$.

ПРИНЦИП НАКОПЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для накопления и обработки экспериментальных данных применялась серия программ, позволяющих производить наблюдение одномерных спектров с ΔE - , E - и x -трактов, двумерных спектров ΔE - E , ΔE - x или E - x , накопление данных для каждого события на магнитный диск ЭВМ СМ-3 в виде кодов ($\Delta E, E, x$), а также комплексную программу обработки каждого события *of-line*, включающую в себя расчет потерь и пробегов продуктов реакции, построение матрицы идентификации частиц с последующим контролем этой идентификации.

Амплитудные сигналы $\Delta E, E$ и x после кодирования записывались на магнитный диск ЭВМ СМ-3. Контроль за накоплением данных и стабильностью энергетических калибровок осуществлялся путем высвечивания на дисплее двумерного спектра ΔE - E . Для повышения эффективности работы электронно-вычислительного комплекса с помощью устройства "координатный шар" в спектре ΔE - E выбиралась световым контуром область, где должен находиться интересующий нас изотоп и остальные изотопы того же элемента. После этого начинался набор на диск, при этом запись событий, соответствующих изотопам вне контура, производилась лишь для одного из каждого N , где число N задавалось в зависимости от скорости счета. С целью повышения быстродействия системы был создан буфер в памяти ЭВМ, и информация передавалась на диск после набора 16 блоков /каждый содержит 84 3-кратных события/, а на дисплее высвечивался только 1 из 16 блоков.

Обработка данных проводилась после окончания эксперимента. Конечной целью обработки является построение энергетического спектра, соответствующего интересующему нас изотопу. Это осуществлялось следующим образом.

Идентификация продуктов реакции проводилась с помощью известных соотношений ^{9/}:

$$\Delta E \times E \sim mZ^2, \quad m/q^2 \sim (Vx)^2/E_{\text{полн}} \quad /2/$$

где m - массовое число, Z - ядерный заряд, q - зарядовое состояние иона при выходе из мишени. Величины, входящие в эти соотношения, рассчитываются из регистрируемых кодов с помощью калибровочных коэффициентов, определяемых двумя независимыми способами. Первый способ состоит в измерении одномерных энергетических (ΔE и E) спектров упруго рассеянного пучка на тонкой мишени. Второй способ основывается на внутренней калибровке по известным изотопам, наблюдаемым в эксперименте одновременно с исследуемым изотопом. Для этих изотопов, исходя из матриц идентификации, строились полные координатные спектры, что давало возможность определить калибровки по координате. Далее из каждого координатного спектра выбирались узкие интервалы /эквивалентные разбросу по энергии - 0,5 МэВ/, а соответствующие им ΔE и E спектры и расчеты потерь энергии частиц в детекторе дают дополнительную энергетическую калибровку.

Энергия $E_{\text{полн}}$, входящая в выражение для m/q^2 равна

$$E_{\text{полн}} = \Delta E + E + \delta E_{\text{окно}} + \delta MC1 + \delta MC2, \quad /3/$$

где $\delta E_{\text{окно}}$, $\delta MC1$ и $\delta MC2$ - потери энергии иона во входном окне камеры, в первом мертвом слое, находящемся между окном и ΔE -участком, и во втором мертвом слое над пропорциональным счетчиком. Сумма этих трех составляющих потерь энергии с хорошей точностью пропорциональна величине ΔE , и тогда уравнение /3/ может быть представлено в виде

$$E_{\text{полн}} = (1 + k_1) \Delta E + E, \quad /4/$$

где коэффициент k_1 определяется на основе расчетных потерь энергии в окне, $MC1$ и $MC2$.

Энергия E в соотношении /2/ для mZ^2 включает в себя потери энергии иона в $\Delta E, E$, $MC1$ и $MC2$. $MC1$ и $MC2$ выражаются через ΔE со своими коэффициентами пропорциональности:

$$E = E + (1 + k_2 + k_3) \Delta E. \quad /5/$$

В результате преобразования основных данных получаются так называемые матрицы идентификации частиц, изображающие выход продуктов в зависимости от параметров mZ^2 и m/q^2 . Пример такой матрицы идентификации показан на рис.4. Видно, что события группируются в пики, соответствующие разным m , Z и q , и достаточно далеко отстоят друг от друга, чтобы обеспечить надежную идентификацию ионов с массой до $A \leq 20$.

Далее на этой матрице световым контуром выделяется интересующий нас изотоп и уже для него строится координатный спектр.

Правильность идентификации проверяется также путем построения для выбранного световым контуром участка матрицы идентифи-

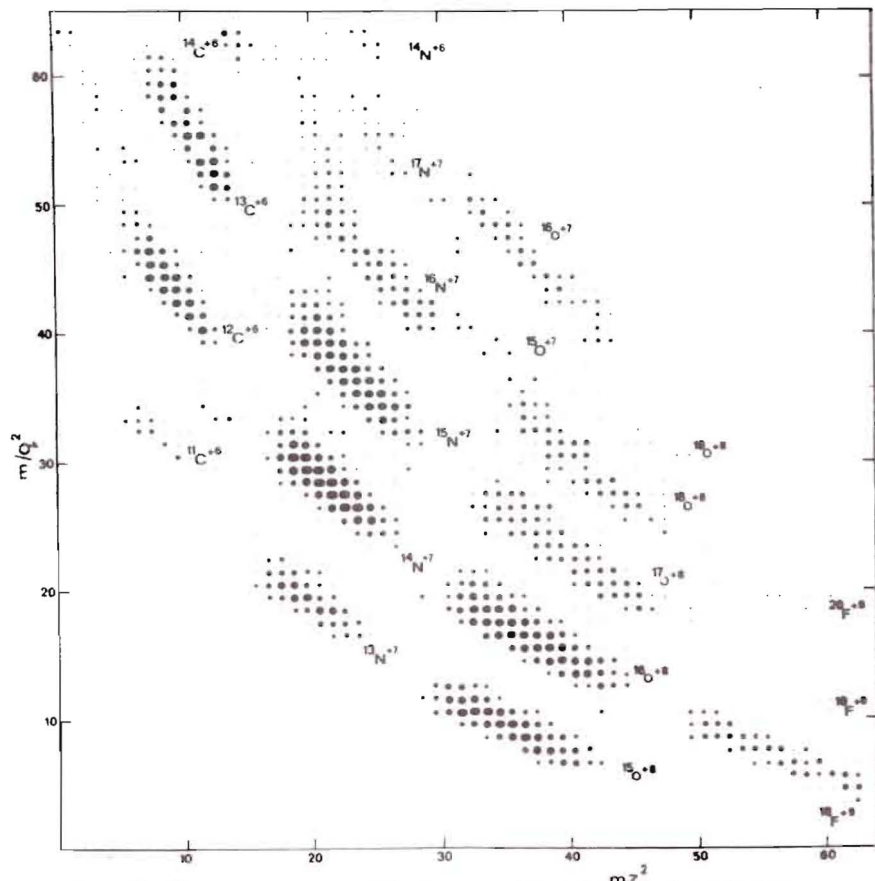


Рис.4. Матрица идентификации, полученная в реакции $^{14}\text{C} / 158 \text{ МэВ} / + ^9\text{Be}$.

кации зависимости $E_{\text{полн}}$ от энергии, рассчитанной по координатному спектру. Группировка событий симметрично осям говорит о правильности обработки. Изображение такого вида позволяет освободиться от лишних событий, которые разбросаны далеко от биссектрисы. Очистка проводится проведением светового контура. Эта операция особенно важна в случае поиска очень редких событий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис.5 представлен координатный спектр упруго рассеянных под углом 8° на тонкой $/400 \text{ мкг/см}^2/$ мишени из Au ядер ^{14}N .

/энергия пучка 158,2 МэВ/. Основной причиной уширения пика $\Delta E/E = 0,70\%$ является энергетический разброс пучка циклотрона, который составляет 0,51%. Рис.6 демонстрирует возможности установки и циклотрона У-300 для измерения энергии ядерных уровней

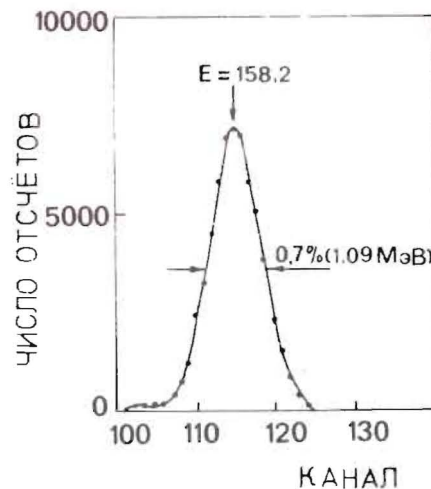


Рис.5. Координатный спектр упругорассеянных ионов $^{14}\text{N}^{+6}$.

Рис.6. Координатный спектр ядер ^{12}C из реакции $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})$, $E = 89,0 \text{ МэВ}$.

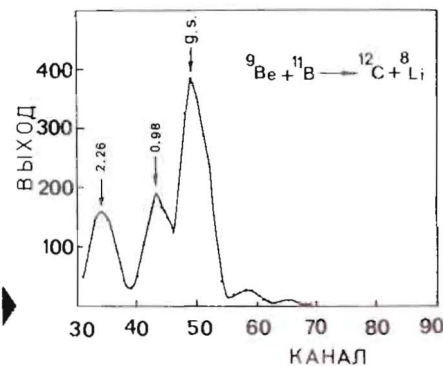


Таблица 2

		кэВ
Стабильность магнитного поля анализатора	0,01%	9
Стабильность энергии пучка	+0,12%	+107
Определение центра пика	+0,009%	+ 7
Неопределенность калибровки координаты	+0,08%	+ 75
Неопределенность толщины мишени	+10%	+ 64
Неопределенность толщины мишени при измерении энергии пучка	+10%	+ 54
Ошибка юстировки магнита по углу	+0,1%	+ 27
* Геометрические размеры мишени	4 мм	+ 53
* Кинематическая неопределенность внутри входной апертуры анализатора	0,52	+212
	+0,33	+278кэВ

* Ошибки коррелируют.

ней и масс ядер. На рисунке представлен координатный спектр ядер ^{12}C , образующихся в реакции $^9\text{Be}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^8\text{Li}$, /энергия пучка 89,0 МэВ/, толщина мишени 380 мкг/см². Спектр измерялся под углом $8^\circ \pm 0,26^\circ$. Стрелками обозначены расчетные значения координат спектра, соответствующие образованию ядер в основном состоянии и возбуждению двух первых уровней в ядре ^8Li /1⁺ и 3⁺/. В табл.2 приведен вклад различных неопределенностей, входящих в ошибку определения средней энергии для пиков. Точность в определении энергии составила величину $\pm 0,33\%$, соответственно точность в определении Q - реакции и массы ^8Li составила величину ~ 280 кэВ. Из таблицы видно, что основную ошибку в определении массы вносит неопределенность распределения продуктов реакции внутри входной апертуры анализатора.

Однако достигнутая точность достаточна для исследования возможных резонансов в области легчайших нейтроноизбыточных ядер и определения нуклонной стабильности этих ядер. Предполагается использовать эту установку для исследования ядер $^{4,5,6,7}\text{H}$, $^{9,10}\text{He}$.

В заключение авторы приносят благодарность академику Г.Н.Флерову за постановку задачи и профессору Ю.Ц.Оганесяну за полезное обсуждение результатов работы и ее поддержку. Авторы благодарят службы эксплуатации циклотрона У-300 и сотрудников электронного отдела за помощь в обеспечении работы аппаратуры и написании программ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Naulin F. et al. Preprint IPNO-PhN-79-27, 1979.
2. Hotchkis M.A.C. et al. Nucl.Phys.1983, A398, p.130.
3. Fifield L.K. et al. Nucl.Phys., 1982, A385, p.505.
4. Woods P.J. et al. Phys.Lett., 1985, 150B, p.79.
5. Bohlen N.G. Preprint Hann-Meitner-Institut FUR Kernforschung, Berlin 83/IR.
6. Shapira D. et al. Nucl.Instr.Meth. 1975, 129, p.123.
7. Erskine J.R. et al. Nucl.Instr.Meth. 1976, 135, p.67.
8. Basargin Yu.J. et al. Nucl.Instr.Meth. 1975, 126, p.413.
9. Goulding F.S., Harvey B.G. Ann.Rev.Nucl.Sci., 1975, 25, p.167.

Белозеров А.В. и др.

13-85-535

Установка для измерения масс ядер, образующихся в двухчастичных реакциях с тяжелыми ионами

На ускорителе У-300 ЛЯР ОИЯИ создана установка для измерения масс ядер, образующихся в двухчастичных реакциях с тяжелыми ионами, на базе широкодиапазонного магнитного анализатора МСП-144. Точность в определении масс ядер на пучке циклотрона составила величину 0,3 МэВ. Предполагается использовать эту установку для исследования легких нейтроноизбыточных ядер $^{4,5,6,7}\text{H}$, $^{9,10}\text{He}$.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Belozerov A.V. et al.

13-85-535

The Facility for Measuring the Masses of Nuclei Emitted in the Two-Body Heavy Ion reactions

The facility on the basis of the MSP-144 magnetic spectrometer measuring the masses of nuclei emitted in the two-body heavy ion reactions is described. The 0,3 MeV accuracy in the mass determination, using the beam of the U-300 cyclotron, has been achieved. The facility will be used to investigate the light neutron-rich nuclei $^{4,5,6,7}\text{H}$, $^{9,10}\text{He}$.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985