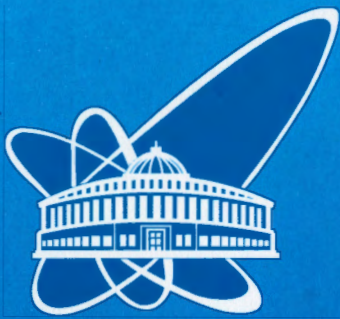


00-167



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

00-167

P13-2000-167

А.Г.Артюх, А.Г.Семченков^{1*}, В.А.Щепунов, Г.Ф.Гриднев,
М.Грушецки², Ф.Косьцельняк², О.В.Семченкова¹,
Ю.М.Середа¹, Я.Шмидер², Ю.Г.Тетерев, Ю.П.Севергин³,
Е.А.Ламзин³, М.Г.Нагаенко³, С.Е.Сычевский³,
И.Н.Вишневский¹

**ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ КИНЕМАТИЧЕСКИЙ
СЕПАРАТОР КОМБАС**

Направлено в журнал «Известия РАН, серия физическая»
и на международную конференцию по ядерной физике
«Кластеры в ядерной физике», Санкт-Петербург, 14–17 июня, 2000

¹НЦ «Институт ядерных исследований» НАН Украины, Киев
²Институт ядерной физики им. Г.Неводничанского, Краков, Польша
³Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д.В.Ефремова, Санкт-Петербург, Россия
*E-mail: semchenkov@main1.jinr.ru

Введение

Проблема исследования свойств ядер на границе нуклонной стабильности вызывает интерес ученых многих стран в течение последних десятилетий. Исследования в этой области ведутся в целом ряде научных центров, таких как GANIL (Франция), GSI (Германия), MSU (США), RIKEN (Япония) и др., в диапазоне энергий от двадцати до нескольких сотен МэВ/А.

В настоящее время существует два основных метода получения пучков экзотических ядер.

Первый заключается в образовании ядер данного типа в мишени-источнике. Ядра, вышедшие из источника, проходят несколько ступеней сепарации и ускорения. С помощью этого метода возможно получение большого набора довольно интенсивных и хорошо очищенных от примесей пучков экзотических ядер. Существенным ограничением данного метода является, однако, невозможность получения короткоживущих изотопов.

Второй метод базируется на анализе и сортировке продуктов ядерных реакций “в пучке” бомбардирующих частиц с сохранением кинематических характеристик синтезированных ядер. Этот метод позволяет выделять и формировать пучки короткоживущих (менее 1 мкс) экзотических ядер и на пролетной базе сепаратора проводить исследование их характеристик. Основная проблема в создании такого рода сепарирующей системы состоит в реализации эффективного сбора ядер и их очистке от примесей других ядер. Решение этой задачи возможно на основе использования широкоапертурных магнитов, обеспечивающих максимальные угловой и импульсный захваты. Как следствие, вторичный пучок имеет большой импульсный и угловой разбросы, что приводит к необходимости событийной регистрации исследуемого продукта с восстановлением всех кинематических характеристик. Использование инверсной кинематики отчасти решает проблему эффективного углового захвата.



Рис.1. Фрагмент-сепаратор КОМБАС в зале циклотрона У-400М (ЛЯР ОИЯИ)

В работе рассмотрен кинематический сепаратор КОМБАС [1] (рис.1), обладающий рекордными параметрами по эффективности сбора и разрешающей способности. Сепаратор, работающий совместно с циклотроном МЦ-400 (ЛЯР ОИЯИ) в диапазоне энергий 20-100 МэВ/А, может эксплуатироваться как в режиме *in-flight* сепаратора, так и в спектрометрической моде, что позволит более подробно изучать механизмы образования экзотических ядер.

1. Сепарация продуктов ядерных реакций фрагмент-сепараторами

Как сепарирующий, канал фрагмент-сепаратор содержит в своем составе производящую мишень, 1-ю магнитную ступень, поглотитель (деградер), установленный в промежуточном фокусе, и 2-ю магнитную ступень. Каждая из ступеней должна содержать как минимум один дисперсионный элемент (дипольный магнит). После прохождения 1-й ступени сепаратора нуклиды, образовавшиеся в реакциях фрагментации тяжелого ядра-снаряда на более легких ядрах производящей мишени, пространственно разделяются в соответствии с их магнитной жесткостью $B\rho$. В линейном приближении положение промежуточного фокуса ΔX_1 связано с $B\rho$ следующим образом:

$$\Delta X_1 = D_{p1} \left(\frac{B\rho}{(B\rho)_0} - 1 \right),$$

где D_{p1} - импульсная дисперсия первой половины сепаратора, $(B\rho)_0$ - магнитная жесткость сепарируемого фрагмента, проходящего по центральной траектории ($\Delta X_1=0$). Щель с полушириной $X_{1\max}$ установленная в промежуточной фокальной плоскости, пропускает нуклиды в диапазоне магнитных жесткостей:

$$(B\rho)_0(1 - X_{1\max}/D_{p1}) \leq B\rho \leq (B\rho)_0(1 + X_{1\max}/D_{p1}) .$$

Важно отметить, что данной полосе сепарации по $B\rho$ соответствует "полоса пропускания" в плоскости (A, Q), где Q и A - зарядовое состояние и массовое число фрагмента. Ориентацию и ширину данной полосы легко получить, используя выражение для магнитной жесткости:

$$B\rho \cong 0,1438 \frac{A}{Q} \sqrt{\frac{E}{A} \left(1 + \frac{E}{1863} \right)},$$

где энергия E, массовое число A, зарядовое состояние Q и жесткость $B\rho$ даны соответственно в МэВ, а.е.м., элементарных зарядах и Тл.м. Так как в реакциях фрагментации приблизительно сохраняется скорость, то при использовании пучков ядер-снарядов с малым энергетическим разбросом и "тонких" производящих мишеней (вносящих малый дополнительный разброс по энергиям) 1-я ступень, как это видно из выражения для $B\rho$, производит сепарацию фрагментов по параметру A/Q.

Деградер и 2-я ступень сепаратора служат для дальнейшей очистки сепарируемого нуклида от большого количества примесей, прошедших через щель в промежуточном фокусе. При прохождении через деградер нуклиды теряют на ионизацию энергию, зависящую от массового числа A и атомного номера Z ядра. 2-я ступень сепаратора пространственно разделяет нуклиды с различными импульсами, разброс по импульсу которых появляется в связи с разными ионизационными потерями нуклидов в деградере. В случае $Q=Z$ (справедливом для легких ядер-снарядов) деградер и 2-я магнитная ступень сепарируют фрагменты по параметру $A^{2.5}/Z^{1.5}$ [2, 3]. Положение конечного фокуса ΔX_2 в этом случае приближенно можно записать так:

$$\Delta X_2 = D_A \frac{\Delta A}{A_0} + D_Z \frac{\Delta Z}{Z_0} + D_V \frac{\Delta V}{V_0} ,$$

где $(\Delta A/A_0)$, $(\Delta Z/Z_0)$, $(\Delta V/V_0)$ – относительные отклонения массового числа, атомного номера и скорости фрагмента от массового числа A_0 , атомного номера Z_0 и скорости V_0 сепарируемого фрагмента; D_A , D_Z , D_V , - массовая, зарядовая и скоростная дисперсии (все три дисперсии прямо пропорциональны импульсной дисперсии D_{p2} 2-й половины сепаратора; D_A и D_Z растут с увеличением толщины деградера и равны нулю при его отсутствии). 2-я ступень настроена так, что $D_V = 0$ (ахроматическая фокусировка). В этом случае через щель, установленную в конечном фокусе и имеющую полуширину X_{2max} , проходят лишь нуклиды с массами и зарядами, удовлетворяющими условию

$$- X_{2max} \leq D_A \frac{\Delta A}{A_0} + D_Z \frac{\Delta Z}{Z_0} \leq X_{2max} .$$

Данное условие определяет 2-ю полосу сепарации в плоскости (A, Z) . После прохождения двух щелей в пучке сепарируемого изотопа остается лишь небольшое количество примесей. Наличие этих примесей, однако, неизбежно, что связано с конечными размерами щелей и обоих фокусов, скоростным разбросом фрагментов, наличием разных зарядовых состояний фрагментов в пучке и их перезарядкой при прохождении через деградер.

2. Магнитооптическая структура сепаратора КОМБАС и его технические характеристики

Основными параметрами сепаратора являются: рабочий диапазон магнитных жесткостей, импульсный и угловой захваты, импульсная разрешающая способность (см. табл.1). Широкий рабочий диапазон магнитных жесткостей установки позволяет сепарировать изотопы, получаемые в различных типах ядерных реакций в большом диапазоне энергий. Для экзотических ядер характерны широкие угловые и энергетические распределения (ширины углового и энергетического распределений фрагмента возрастают с увеличением числа переданных от ядра-снаряда нуклонов) и

низкие сечения их образования. Эффективный сбор и сепарация таких ядер возможны лишь в широкоапертурных системах. На рис. 2 показана эффективность сепаратора КОМБАС (линия 3) и двух установок подобного типа в зависимости от отношения массового числа фрагмента A_f к массовому числу ядра-снаряда A_p . Линия 1 на рисунке соответствует сепаратору LISE (GANIL, Франция), а линия 2 – сепаратору RIPS (RIKEN, Япония). Как видно из рисунка, в области малых A_f/A_p (т.е. при больших

Табл.1. Сравнительные характеристики фрагмент-сепараторов

Название	$\Delta\Omega$, мстр	$\Delta p/p$, %	Максимальная жесткость, Тл·м	Разрешающая способность
LISE	1.0	5.0	3.2	800
FRS	0.7-2.5	2.0	9-18	240-1500
A1200	0.8-4.3	3.0	5.4	700-1500
RIPS	5.0	6.0	5.76	1500
COMBAS	6.4	20	4.5	4360

передачах нуклонов) эффективность КОМБАСа превосходит эффективность, например сепаратора LISE, на порядок.

Следующим важным параметром сепаратора является импульсное разрешение его 1-й половины R_{p1} . Высокое значение этого параметра позволяет использовать сепаратор как для прецизионной спектроскопии кинематических характеристик продуктов ядерных реакций, так и для достижения высокой степени очистки изотопов от примесей. (Заметим, что разрешение всего канала по массовому числу A и атомному номеру Z прямо пропорционально R_{p1}) Разрешающая способность, приведенная в табл. 1, рассчитана для мишени размером $x_0=1$ мм по ионно-оптической формуле 1-го порядка:

$$R_{p1} = \frac{D_{p1}}{M_1 x_0}$$

где D_{p1} и M_1 – импульсная дисперсия и увеличение 1-й половины канала. Данная формула справедлива для малых телесных углов. По причине оптических aberrаций

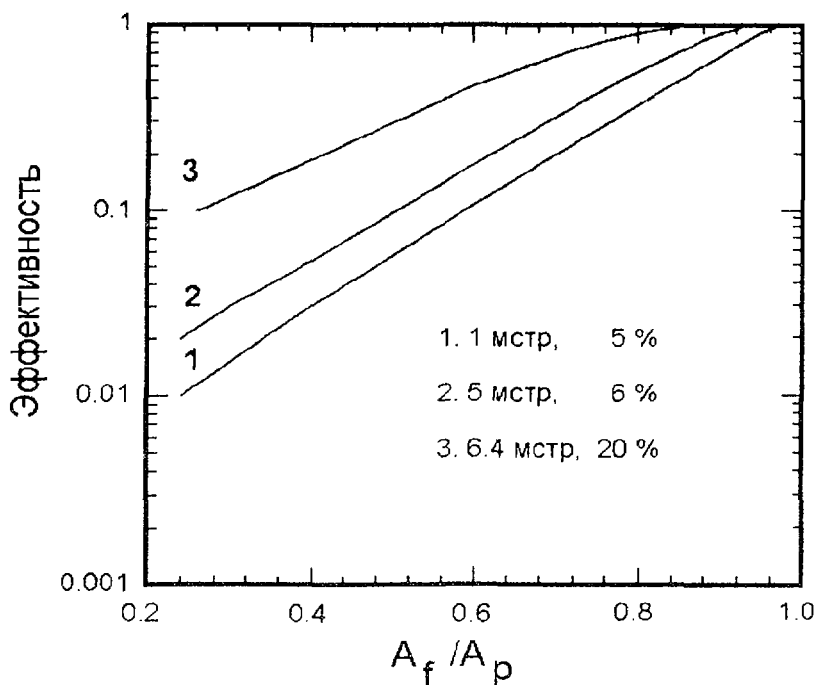


Рис.2. Зависимость эффективности фрагмент-сепаратора от отношения массы фрагмента A_f к массе ядра-снаряда A_p

значение R_{pl} в полном телесном угле заметно снижается. Для уменьшения влияния aberrаций 2 и 3 порядков на разрешение сепаратора его магнитооптическая структура была оптимизирована. Разрешение сепаратора после оптимизации составляет $R_{pl} \approx 700$ (для $x_0 = 1$ мм).

Кроме требований к основным параметрам установки, были поставлены требования к максимальной длине канала (14,5 м) и максимальному размеру мишени (5 мм). Это позволяет, соответственно, сепарировать фрагменты с временем жизни менее 1 мкс и работать с производящими мишенями достаточно больших поперечных размеров.

Основной технической проблемой при создании высокоэффективного и высокоразрешающего in-flight сепаратора КОМЕАС на базе широкоапертурных

поворотных магнитов была проблема минимизации сильных абберационных эффектов. Отказ от традиционной схемы построения сепаратора на основе специализированных квадрупольных, секступольных и октупольных магнитов с ограниченной апертурой и использование мультипольных широкоапертурных магнитов позволил достичь нужных значений импульсного разрешения, углового и импульсного захватов. Кроме этого, данный подход позволил уменьшить полное количество необходимых магнитных элементов.

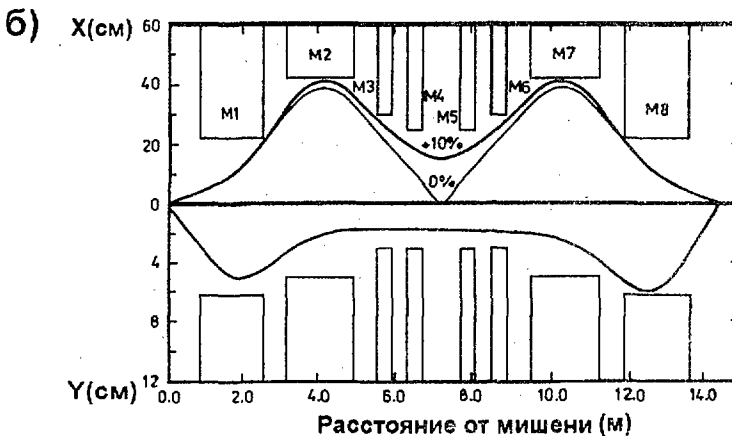
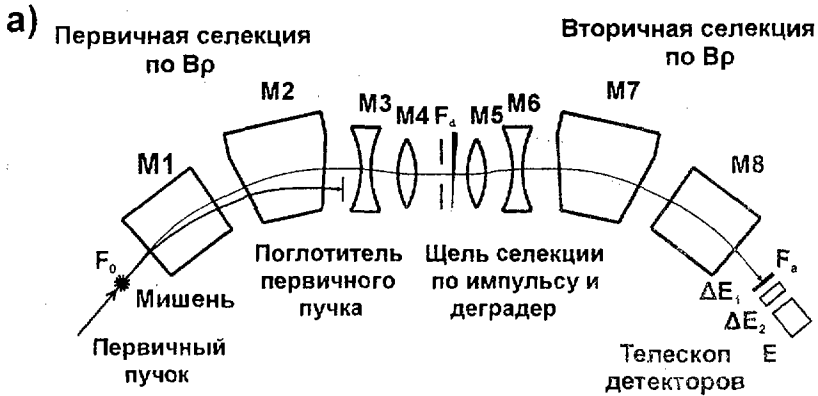


Рис.3. (а) Магнитооптическая схема фрагмент-сепаратора КОМБАС.

(б) Горизонтальная (ось OX) и вертикальная (ось OY) огибающие пучка магнитного канала сепаратора. Толстая линия – горизонтальная огибающая пучка при импульсном захвате $\delta = \pm 10\%$, тонкая линия - при импульсном захвате $\delta = \pm 0\%$

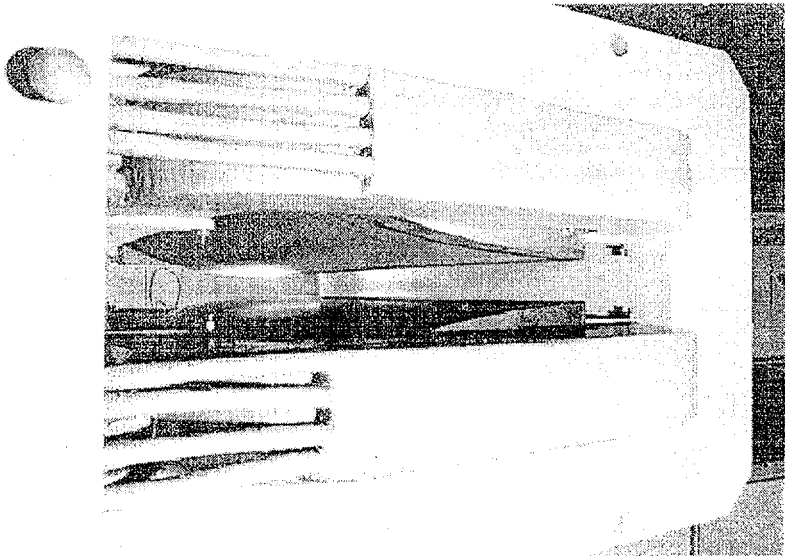


Рис.4. Анализирующий мультипольный магнит М1 (12Х55ЭСН162.5-1.125-25)

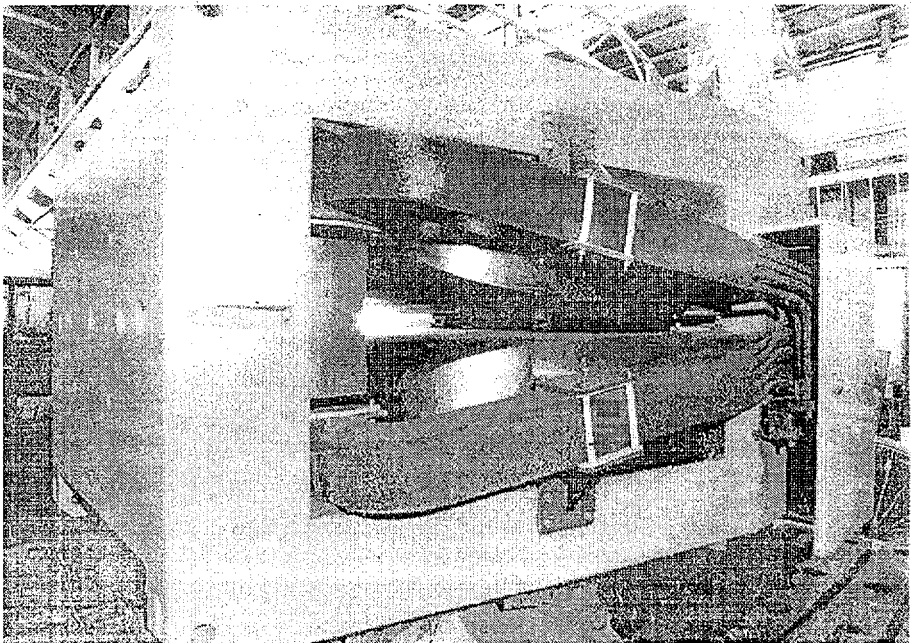


Рис.5. Анализирующий мультипольный магнит М2 (10Х85ЭСН164-1.125-25)

В 1-ю ступень (рис.3.а) сепаратора входят два 25-градусных анализирующих магнита M_1 (рис.4) и M_2 (рис.5), основным назначением которых является сбор и фокусировка фрагментов в дисперсионном промежуточном фокусе, и два управляющих магнита M_3 и M_4 с углами поворота $7,5^\circ$ и коррекцией аббераций 2 и 3 порядков в промежуточном фокусе. 2-я ступень сепаратора является зеркальным отражением 1-й ступени относительно промежуточной фокальной плоскости. Магнитные и оптические параметры магнитов M_5 , M_6 , M_7 и M_8 идентичны параметрам M_4 , M_3 , M_2 и M_1 соответственно. Выбор симметричной магнитной структуры сепаратора значительно упростил оптимизацию его оптических параметров 1-3 порядков, снизил стоимость всего проекта и облегчил настройку и эксплуатацию установки.

Оптическая схема 1 порядка сепаратора (рис.3,б) основана на принципе жесткой фокусировки: необходимые фокусирующие свойства всей системы достигаются путем введения знакопередающихся градиентов в поля магнитов M_1 , M_2 и M_7 , M_8 . Высокое линейное разрешение достигнуто выбором угла отклонения M_1 и M_2 ($2 \times 25^\circ$). Использование низкодисперсионного промежуточного фокуса ($D_{pl}=1,53 \text{ см/}\%$) позволило сохранить относительно малые радиальные размеры пучка в фокусе при большом импульсном захвате. Аналогично формированию оптики 1 порядка (путем введения квадрупольных компонент поля) коррекция сферических и хроматических аббераций 2 и 3 порядков в промежуточном и конечном фокусах достигнута добавлением секступольных и октупольных компонент в поля всех 8 магнитов.

Реализация вышеперечисленных технических идей позволила создать сепаратор с рекордными характеристиками (см. табл.1).

3. Магнитные элементы

Для получения магнитного канала с заданными оптическими свойствами радиальные распределения полей всех магнитов были сформированы в виде

$$B(\Delta R) = B_0 \left(1 - n \frac{\Delta R}{R} + (\beta_2 R) \Delta R^2 + (\beta_3 R) \Delta R^3 \right),$$

где B_0 - поле на оптической оси магнита, n - индекс неоднородности магнитного поля (квадрупольная компонента), β_2 , β_3 - секступольная и октупольная компоненты магнит-

ного поля соответственно. Кроме этого, скруглением обоих торцевых поверхностей полюсов в каждом управляющем магните М₃-М₆ были введены 8 дополнительных секstupольных компонент поля. В табл. 2 приведены параметры n , β_2 , β_3 , входные R_{in} и выходные R_{out} радиусы скругления торцов полюсов М₃-М₆, рассчитанные в результате оптимизации ионно-оптических параметров сепаратора. Как видно из таблицы, в полях магнитов М₁ и М₈ имеются квадрупольная и октупольная компоненты, в полях М₂ и М₇ – все три вида компонент, а в полях М₃-М₆ – секstupольная и октупольная компоненты. Октупольные компоненты в М₁ и М₈ предназначены для коррекции сферических aberrаций 3 порядка, а секstupольные и октупольные компоненты в остальных магнитах – для коррекции как сферических, так и хроматических aberrаций 2 и 3 порядков.

Радиальные зависимости полей были созданы вариацией вертикальных зазоров магнитов путем профилирования их полюсных наконечников. Сильные изменения зазоров (и полей) от одного края рабочей дорожки к другому потребовали прецизионных расчетов профилей полюсов, в которых учитывались эффекты насыщения. Для обеспечения магнитной идентичности полюса М₁, М₈ и М₂, М₇ вырезались из одной заготовки.

После изготовления магнитов и проведения магнитных измерений как радиальные, так и торцевые профили полюсов корректировались для лучшего соответствия параметров реальных полей расчетным требованиям. Для тонкой подстройки мультипольных компонент (в пределах 1%) на полюсах магнитов М₄ и М₅ установлены токовые корректирующие катушки.

Табл.2. Проектные параметры полей магнитов (квадрупольные, секstupольные и октупольные компоненты) сепаратора КОМБАС

Магниты	R_{in} , см	R_{out} , см	n	β_2 , см ⁻²	β_3 , см ⁻³
М1(М8)	-	-	11.0024	0	$1.67 \cdot 10^{-8}$
М2(М7)	-	-	-6.75	$-2.77 \cdot 10^{-7}$	$-4.02 \cdot 10^{-10}$
М3(М6)	-50	-50	0	$6.69 \cdot 10^{-7}$	$-2.38 \cdot 10^{-8}$
М4(М5)	50	50	0	$-2.62 \cdot 10^{-6}$	$-1.46 \cdot 10^{-8}$

4. Детектирующая система

В состав детектирующей системы сепаратора входят двухкоординатные лавинные счетчики в промежуточном фокусе размером 360×50 мм и разрешением 2 мм, двухкоординатные лавинные счетчики в выходном фокусе размером 80×80 мм и разрешением 2 мм, набор сборок телескопов кремниевых детекторов большой площади ($\varnothing 60$ мм) $\Delta E-E$ в выходном фокусе (380 мкм – 4,4 мм; 380 мкм – 4,1 мм; 380 мм – 7 мм). Тонкие ΔE -детекторы являются стриповыми с разрешением по координате 2 мм. Данный набор детекторов позволяет проводить идентификацию продуктов методиками $\Delta E-E$ и $\Delta E-T$.

5. Экспериментальная научная программа

В рамках научной программы на сепараторе были проведены эксперименты по измерению относительных выходов изотопов в пределах жесткостей 0,5 - 4 Тл·м в реакции $^{18}\text{O}(32 \text{ МэВ/А}) + ^9\text{Be}$, $^{18}\text{O}(32 \text{ МэВ/А}) + ^{181}\text{Ta}$ на тонких мишенях (14 мг/см^2), получению вторичных пучков радиоактивных изотопов ^{14}Be , ^{12}Be , ^{11}Li в реакции $^{18}\text{O}(32 \text{ МэВ/А}) + ^9\text{Be}$ (173 мг/см^2) на толстой мишени, измерению относительных выходов изотопов в пределах жесткостей 0,5 – 4 Тл·м в реакции $^{22}\text{Ne}(42 \text{ МэВ/А}) + ^9\text{Be}$, $^{18}\text{O}(32 \text{ МэВ/А}) + ^{181}\text{Ta}$ на тонких мишенях (14 мг/см^2) и получению вторичных пучков радиоактивных изотопов ^{15}B , ^{17}B , ^{11}Li , ^{12}Be , ^{14}Be в реакции $^{22}\text{Ne}(45 \text{ МэВ/А}) + ^9\text{Be}$ (173 мг/см^2) на толстой мишени.

Научная программа на сепараторе предполагает эксперименты по исследованию механизмов реакций образования нейтронно-избыточных изотопов В, Li, Be, O, F на пучках ^{18}O , ^{22}Ne , $^{34,36}\text{S}$, $^{36,40}\text{A}$, $^{40,48}\text{Ca}$ с энергией 30 - 50 МэВ/А и мишенях ^1H , ^4He , ^9Be , ^{181}Ta . Предполагается проводить эксперименты со вторичными пучками ^{15}B , ^{17}B , ^{11}Li , ^{12}Be , ^{14}Be по упругому рассеянию и малонуклонным реакциям передач на ^4He , т.р.

6. Заключение

В Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ создан и запущен в эксплуатацию широкоапертурный кинематический фрагмент-сепаратор КОМБАС. Прибор предназначен для получения интенсивных пучков короткоживущих

экзотических ядер с высокой степенью очистки. Кроме этого, сепаратор может быть использован в качестве высокоразрешающего спектрометра для исследования механизмов образования экзотических ядер, а также для исследования свойств ядер на границах протонной и нейтронной стабильности.

В заключении мы хотим поблагодарить Ю.Ц.Оганесяна за поддержку работы по созданию установки, помощь в разработке научной программы и проведении первых экспериментов, В.З.Майдикова, С.В.Перова, С.А.Клыгина, А.В.Воронова за участие в экспериментах, а также коллектив ускорителя МЦ-400 за обеспечение пучком.

Литература

1. A.G.Artukh et al. // Nucl. Instr. & Meth. A306 (1991) 123; A.G.Artukh et al. // Nucl. Instr. & Meth. A426 (1999) 605.
2. J.P. Dufour, R. Del Moral et al. // Nucl. Instr. & Meth. A 248 (1986) 267.
3. K.-H. Schmidt, E. Hanelt, H. Geissel, H. Muenzenberg and J.P. Dufour // Nucl. Instr. & Meth. A 260 (1987) 287.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 июля 2000 года.