

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P6-85-238

В.М.Абазов, А.К.Качалкин, Э.Крупа, Н.А.Лебедев,
Г.Лизурей, В.А.Морозов, В.Таньска-Крупа,
Э.Худайбердиев*

**МОДЕРНИЗАЦИЯ
МАГНИТНО-ЛИНЗОВОГО БЕТА-СПЕКТРОМЕТРА
ДЛЯ ON-LINE ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

* Самаркандский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

Изучение радиоактивного распада ядер, удаленных от полосы бета-стабильности, привело к развитию экспериментальной техники и в том числе спектрометров ядерного излучения, работающих в линию с масс-сепаратором на пучках ускоренных частиц. Непосредственному анализу могут быть подвергнуты продукты ядерных реакций или в самой мишени, или после вылета радиоактивных ядер из мишени в результате отдачи или диффузии. Транспортировка ионного пучка определенной изобары, полученной на масс-сепараторе, непосредственно к детектирующему устройству /спектрометру/ позволяет изучать радиоактивные ядра с предельно короткими периодами полураспада.

Одной из задач, решаемых в on-line экспериментах, является исследование спектров бета-частиц, позитронов, а также спектров конверсионных электронов, что дает возможность определять характер бета-распада и мультипольности гамма-переходов. Анализ β^{\pm} - γ -совпадений, а также θ - γ -совпадений позволяет определять разности масс ядер, строить схемы распада, определять времена жизни состояний и т.д. Изучение свойств ядер, сильно удаленных от полосы бета-стабильности, связано с рядом экспериментальных трудностей, так как эти ядра имеют малые сечения образования в ядерных реакциях и малые периоды полураспада. В этих условиях необходимо искать компромисс в выборе параметров используемых спектрометров ядерного излучения. Назовем основные из них: энергетическое разрешение; диапазон анализируемого спектра энергий ядерного излучения; светосила спектрометра; величина фона, обусловленного или шумами детектирующего устройства, или вкладом от гамма-излучения; время, необходимое на транспортировку радиоактивного источника.

В последние годы для исследования спектров электронов конверсии на пучках заряженных частиц широко используются магнитно-линзовые бета-спектрометры с промежуточным изображением, а также спектрометры типа "мини-апельсин", в которых в качестве детектора используются Si(Li)-детекторы электронов ¹⁻⁵. Применение Si(Li)-детекторов дает возможность регистрировать электроны в некотором энергетическом интервале, величина которого зависит от светосилы и значений магнитной индукции в спектрометре. Подобные спектрометры позволяют эффективно проводить исследования спектров конверсионных электронов. Однако в ряде случаев интерпретация результатов временных измерений при использовании этих спектрометров затруднена вследствие невозмож-

ности полного учета всех факторов, влияющих на процесс формирования выходного импульса в ППД. Поэтому в тех случаях, когда необходимо определять предельно короткие времена жизни уровней, в магнитных спектрометрах продолжают применяться сцинтилляционные детекторы для регистрации электронов^{/5,6/}.

В нашей работе была проведена модернизация магнитно-линзового бета-спектрометра типа Герхольма^{/7/} с целью использования его в *on-line* экспериментах на фазотроне ЛЯП ОИЯИ для определения времен жизни возбужденных состояний ядер, удаленных от полосы бета-стабильности.

МАГНИТНО-ЛИНЗОВЫЙ СПЕКТРОМЕТР /МЛС/

Одно из основных достоинств МЛС типа Герхольма^{/8,9/} заключается в изохронности траекторий электронов в спектрометре при сравнительно высокой светосиле и разрешении по энергии, что обеспечивает эффективное использование спектрометров данного типа в установках совпадений. Описываемый спектрометр предназначен для работы на пучке ионов масс-сепаратора фазотрона ЛЯП в следующем режиме:

1. Пучок ионов будет подводиться и высаживаться на ленте, управляемой лентопротяжным устройством /ЛПУ/ таким образом, что накапливаемый радиоактивный материал одновременно будет источником спектрометра.

2. С целью устранения влияния распада дочерних ядер на измерения через некоторое время использованный материал будет удален, а его место займет чистый участок ленты.

Такая система подведения активности к спектрометру обеспечивает точную постановку источника и дает возможность провести измерения короткоживущих радиоактивных ядер.

В связи с этим модернизация МЛС была необходима для внесения изменений в конструкцию спектрометра с целью размещения ЛПУ. Помимо этого решалась задача снижения фоновых загрузок бета-детектора за счет введения винтовых диафрагм для сепарации электронов от позитронов и исключения вклада шумов фотоумножителя в низкоэнергетическую часть бета-спектра конверсионных электронов.

Спектрометр /рис.1/ состоит из железного цилиндрического кожуха, катушки, вакуумной камеры с системой диафрагм и сцинтилляционного детектора. Специальная форма железного ядра обеспечивает создание магнитного поля, которое по своей форме напоминает треугольник. Такое поле, как показали расчеты^{/10,11/}, обладает хорошей дисперсией и фокусирующими свойствами для электронов, вылетающих из источника в широком диапазоне углов $/10 \div 40/^\circ$.

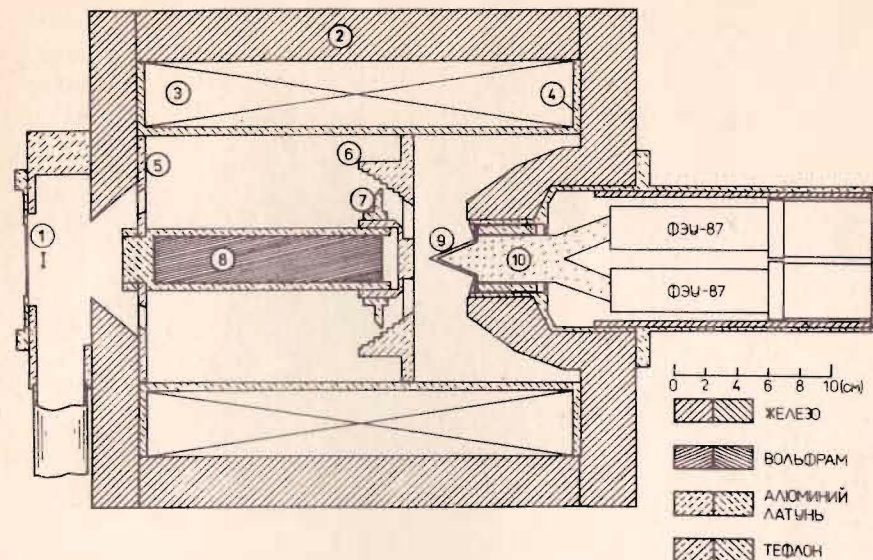


Рис.1. Общий вид спектрометра. 1 - источник, 2 - железный кожух, 3 - катушка, 4 - алюминиевый каркас, 5 - входная диафрагма, 6 и 7 - внешняя и внутренняя выходные диафрагмы, 8 - вольфрамовая защита, 9 - пластический сцинтиллятор, 10 - световод.

Применявшийся нами ранее спектрометр, который послужил основой для модернизации МЛС, обладал следующими параметрами: диапазон регистрируемых электронов от 20 до 700 кэВ, разрешение 0,8-5% при светосиле $1 \div 5\%$. Источник помещался в прибор при помощи шлюзового устройства и находился на расстоянии 1 см от внешней грани фланца спектрометра. Так как при работе в линию с масс-сепаратором носителем источников является лента, то размещение ЛПУ потребовало расположения источника уже на расстоянии 3 см от фланца. Это привело к необходимости нового определения траекторий электронов в спектрометре с целью оптимизации параметров выделяющих диафрагм и расчета винтовых диафрагм для сепарации электронов и позитронов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ЭЛЕКТРОНОВ

Траектории электронов в магнитном бета-спектрометре можно определить несколькими способами: посредством прямых измерений при использовании, например, источника моноэнергетических электронов и в качестве регистратора - фотопленки; и косвенным методом - на основе решения уравнений движения электронов в маг-

нитном поле заданной формы - по экспериментально измеренному или вычисленному распределению магнитного поля в спектрометре.

В нашем случае проверялась согласованность результатов, полученных прямыми и косвенными методами. Хорошее согласие этих данных позволило детально изучить влияние формы магнитопровода на электронно-оптические свойства МЛС.

Векторный потенциал \vec{A} постоянного магнитного поля определяется уравнением $\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \vec{A} \right) = -0,4\pi \vec{j}$, где $\mu = \mu(|\vec{B}|)$ - магнитная проницаемость, \vec{j} - плотность тока.

Для аксиально-симметричного магнитного поля это уравнение в цилиндрической системе координат $\{r, z, \phi\}$ с осью z , совпадающей с осью симметрии, имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu r} \frac{\partial (rA)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{\mu r} \frac{\partial}{\partial r} (rA) = -0,4\pi j(r, z), \quad /1/$$

где $A = |\vec{A}| = A_\phi$ - ϕ -я компонента векторного потенциала.

В работе [12] показано, что при условиях:

а/ область решения уравнения разбивается на треугольные участки /рис.2/;

б/ A изменяется линейно, а j и μ - постоянны внутри каждого треугольника;

в/ границы подобластей с разными значениями j и μ проходят вдоль сторон треугольников;

г/ значения $\mu \frac{\partial A}{\partial n}$ непрерывны на сторонах треугольников, уравнение /1/ сводится к системе конечно-разностных уравнений

$$\sum_i^6 W_i (A_i - A_m) + \frac{0,4\pi}{3} \sum_i^6 j_i S_i = 0, \quad /2/$$

где суммирование для точки m /рис.2/ ведется по всем треугольникам, для которых точка m является общей, S_i - площадь треугольника и $W_i = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_i} \operatorname{ctg} \theta_{2,1} + \frac{1}{\mu_{i-1}} \operatorname{ctg} \theta_{1,1-1} \right)$.

Вводя параметр релаксации $\omega / 0 < \omega < 2/$, получим из /2/

$$A_m^{n+1} = A_m^n + \omega \left(\frac{\sum_i^6 W_i A_i^{n,n+1} + \frac{4}{3} \pi \sum_i^6 j_i S_i}{\sum_i^6 W_i} - A_m^n \right), \quad /3/$$

где ω - параметр верхней релаксации, n - номер итерации.

Для решения этой системы конечно-разностных уравнений были использованы программы AXMASH и AXTRI из системы программ TRIMA [13]. С помощью программы AXMASH вводится конфигурация спектрометра и генерируется треугольная сетка. С помощью программы AXTRI методом последовательной верхней релаксации вычисляются значения векторного потенциала магнитного поля в уз-

Рис.2. Ячейка области магнитного поля, решаемая системой конечно-разностных уравнений.

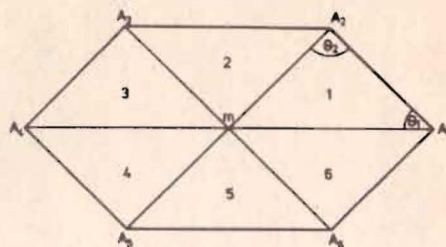
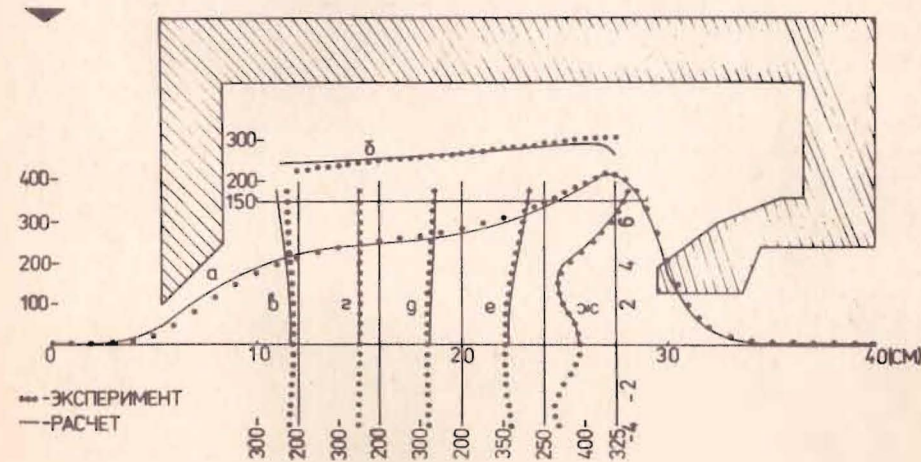


Рис.3. Экспериментальные и вычисленные значения осевой составляющей магнитной индукции в спектрометре при токе $I = 6,08$ А.



лах этой сетки. Для вычислений использовалась зависимость $\mu = \mu(|\vec{B}|)$ для конструкционной стали марки СТ-3. По значениям векторного потенциала в узлах сетки мы вычисляли значения компонент индукции магнитного поля B_x , B_y и B_z , используя соотношения

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rA); \quad B_x = -\frac{x}{r} \frac{\partial A}{\partial t}; \quad B_y = -\frac{y}{r} \frac{\partial A}{\partial t}.$$

Результаты вычислений значений магнитной индукции внутри спектрометра, а также сравнение их с экспериментальными данными представлены на рис.3. Приведены значения магнитной индукции вдоль оси спектрометра и вдоль отрезка, параллельного оси, на расстоянии 7 см от нее /кривые а и б/, а также вдоль радиуса спектрометра на расстояниях 12, 16, 20, 24 и 27,5 см /кривые в, г, д, е, ж/. Экспериментальные точки получены с помощью датчика Холла размерами 2×2 мм². Значения магнитной индукции /в Гс/ указаны с левой стороны каждой шкалы, показывающей места измерения. Как видно из рисунка, получено хорошее согласие формы распределения магнитного поля как вдоль оси, так и по радиусу в различных сечениях. В целом максимальное расхождение экспериментальных и вычисленных значений магнитной индукции не превышает 3÷4%.

Для вычисления траекторий электронов была использована программа RTYCDC^{/14/}, которая решает систему уравнений движения $\frac{m}{e} \frac{d}{dt} \vec{v} = [\vec{B} \times \vec{v}]$.

Уравнения в цилиндрической системе координат решены для источников, расположенных на оси спектрометра:

$$-\frac{m}{e} \frac{d\phi}{dt} = \frac{A}{r}; \quad -\left(\frac{m}{e}\right)^2 \frac{d^2 z}{dt^2} = A \frac{\partial A}{\partial z}; \quad -\left(\frac{m}{e}\right)^2 \frac{d^2 r}{dt^2} = A \frac{\partial A}{\partial r}. \quad /4/$$

Программа RTYCDC интегрирует систему уравнений /4/ по формуле Штермера^{/15/} пятой степени. При этом в качестве начальных данных требуются значения параметров траектории в пяти точках. Эти величины вычислялись с помощью интегрирования системы уравнений /4/ методом Рунге^{/15/}.

На рис.4 показаны вычисленные траектории электронов в МЛС для оптимальных углов вылета электронов из источника. На рис.5 представлены углы поворота электронов в магнитном поле спектрометра и расстояния траекторий электронов от его оси, показанные в сечениях на расстоянии 1,3,5 см и далее через 1 см вдоль оси до 23 см для электронов, вылетающих из источника в пределах углов от 23 до 37°. Из рис.4 и 5 видно, что оптимальным для выходной диафрагмы является расположение на расстоянии 22 см от источника.

Экспериментальная проверка траекторий электронов была проведена фотографированием изображения К-электронов от перехода 165 кэВ ¹³⁹La. Электроны проходили через прямолинейную щелевую диафрагму, установленную перпендикулярно к оси спектрометра, в месте расположения входной диафрагмы. Для регистрации электронов была использована рентгеновская пленка, которая последовательно располагалась на различных расстояниях от входной диафрагмы. Регистрация происходила при включенном и выключенном токе в линзе. Хорошее согласие результатов эксперимента и расчета позволило использовать результаты расчетов для определения профиля винтовых диафрагм /рис.6/, а также формы линии моноэнергетических электронов.

Вычисление формы линий проводилось при помощи видоизмененной программы RTYCDC. Выделяемый входной диафрагмой пучок электронов разбивался на 30 малых участков. Для каждого из них при определенном импульсе электронов программа прослеживала возможность их прохождения через заданную выходную щель /см. рис.4/. Для всех траекторий, проходящих через выходную щель, суммировались соответствующие им телесные углы и, таким образом, получалась одна точка на графике соответствующей формы линии. В дальнейшем импульс электронов изменялся на малую величину и прежним способом получалась следующая точка кривой.

Одновременно прослеживалось влияние угла захвата входной диафрагмы на разрешение и светосилу спектрометра, и в зависимо-

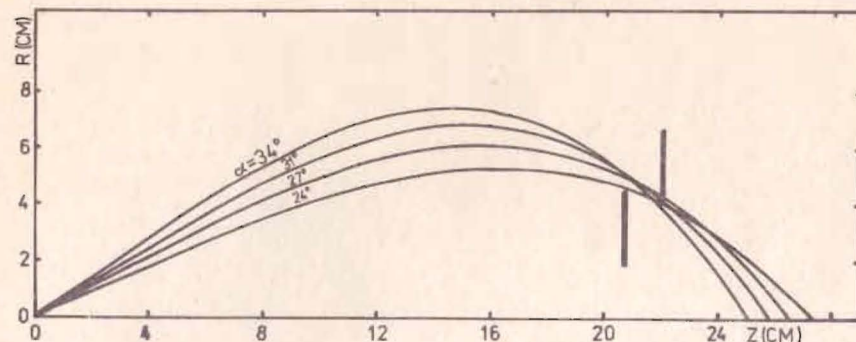


Рис.4. Огибающие траекторий электронов для оптимальных углов вылета.

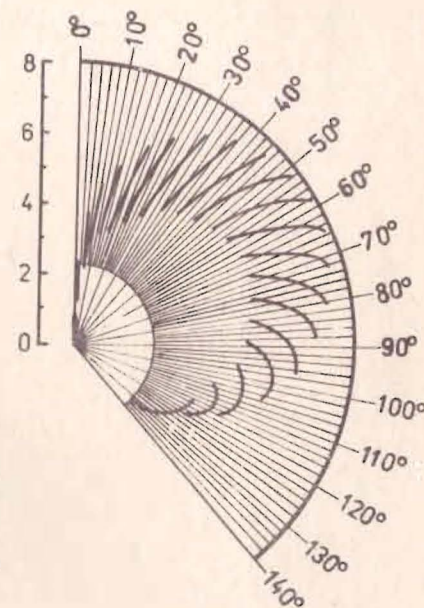
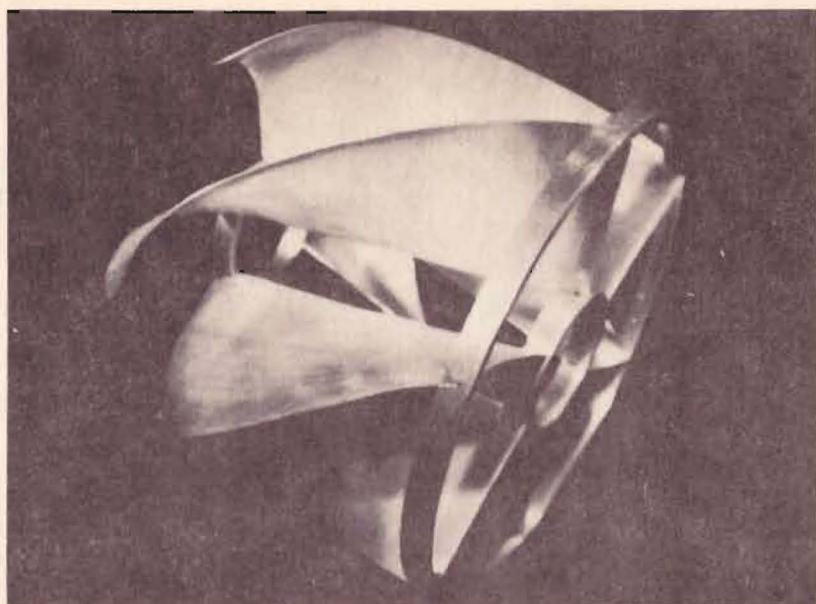
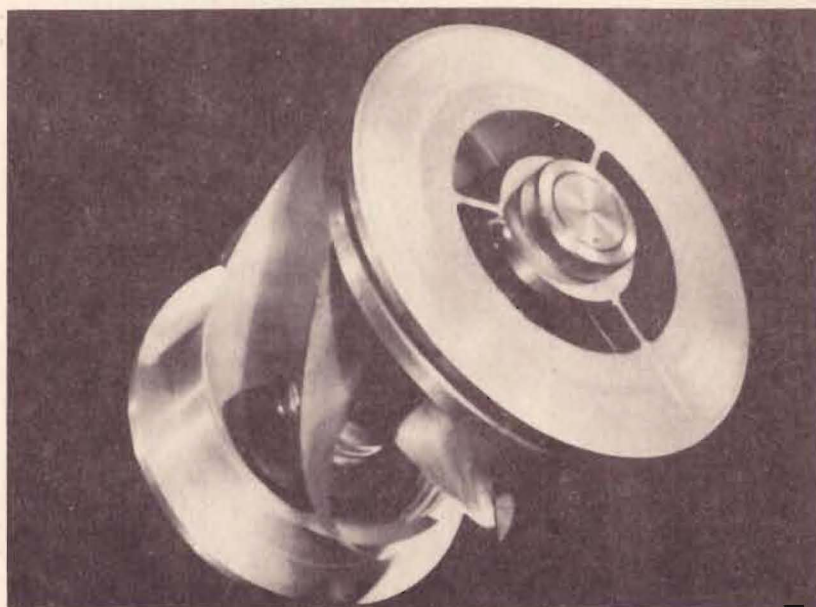


Рис.5. Углы поворота электронов и расстояния траекторий электронов от оси спектрометра /внешний круг рисунка соответствует диаметру вакуумной камеры спектрометра/.

сти от ширины щели выходной диафрагмы можно было определить оптимальную ширину входной диафрагмы. Влияние угла захвата входной диафрагмы на разрешение спектрометра хорошо видно по форме линий 3 и 4 на рис.7, которые были получены /как видно из табл.1/ при одинаковой ширине выходной диафрагмы /3 мм/, но при разной ширине входной диафрагмы 25 ± 35° и 23 ± 37°. Из этих кривых видно, что при незначительной потере в светосиле спектрометра получено существенное улучшение его разрешающей способности.



а



б

Рис.6. Вид винтовых диафрагм /а/ и система выделяющих диафрагм /б/.

Таблица 1

Расчетные значения разрешения МЛС в зависимости от параметров диафрагм

| № | Разрешение R (%) | Аксептанс входной диафрагмы | Размер щели выходных диафрагм (мм) | T (%) |
|---|------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------|
| 1 | 0,84 | 26° - 36° | 1 | 2,9 |
| 2 | 1,3 | 26° - 34° | 2 | 3,6 |
| 3 | 1,8 | 25° - 35° | 3 | 4,5 |
| 4 | 2,1 | 23° - 37° | 3 | 4,6 |
| 5 | 2,5 | 23° - 37° | 4 | 4,8 |
| 6 | 2,8 | 23° - 37° | 5 | 4,8 |

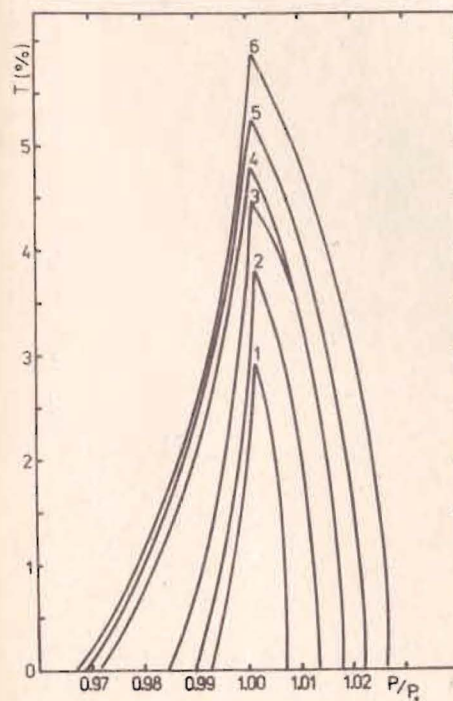


Рис.7. Вычисленные формы линий для разных величин входной и выходной диафрагм /см.табл.1/.

В табл.1 даны результаты вычислений для определения оптимальных условий работы спектрометра. Можно выделить три режима работы спектрометра со следующим выбором углов захвата входных диафрагм:

1/ 23 - 37° - для работы с наибольшей светосилой /~5%/ и умеренным разрешением;

2/ 25 - 35° - для работы с разрешением 2% и светосилой ~4%;

3/ 26 - 34° - для работы с разрешением ~1% и светосилой более 3% для источников точечных размеров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Контрольные измерения были проведены с помощью источника ^{167}Tm , прокалиброванного по абсолютной активности. Источник был приготовлен методом выпаривания на алюминизированной майларовой подложке, диаметр источника не превышал 2 мм. Анализировались линии ЭВК γ -перехода с энергией 208 кэВ в ^{167}Er .

Электроны из источника проходили входную, винтовую и выходную диафрагмы и попадали на конусообразный пластический сцинтиллятор толщиной 2 мм. Сцинтиллятор через посредство раздвоенного световода соединялся с двумя ФЭУ-87, которые были включены на совпадения с целью исключения шумовых импульсов. Вакуум в спектрометре поддерживался на уровне 10^{-5} Торр.

Указанный на рис.8 участок спектра снимался в мультискейлерном режиме при помощи управляемого от многоканального анализатора блока питания спектрометра, ранее описанного в работе [16]. Во вставке рис.8 приведена зависимость разрешения спектрометра от светосилы как до /кривая а/, так и после модернизации спектрометра /кривая б/. Как видно из рисунка, оптимизация положения фокусирующих диафрагм позволила несколько улучшить светосилу МЛС, не ухудшив при этом его разрешения. Можно отметить также хорошее согласие наблюдаемых величин с расчетными значениями.

На основе измеренных интенсивностей К- и L-конверсионных линий перехода 208 кэВ в ^{167}Er без винтовой и с винтовой диафрагмой было найдено, что винтовая диафрагма пропускает не менее 93% электронов, эмитированных в направлении детектора.

В табл.2 приведены данные для разрешения и светосилы МЛС в условиях, когда аксептанс входной диафрагмы был зафиксирован в пределах $25^\circ - 35^\circ$.

Проведенная таким образом модернизация МЛС позволила приспособить его для работы на пучке масс-сепаратора и не только сохранить, но и улучшить в некотором отношении электронно-оптические свойства спектрометра по сравнению с прототипом.

Изготовленные винтовые диафрагмы обладают высокой трансмиссией и обеспечивают надежную сепарацию частиц разного знака. Использование в детекторе двух фотоумножителей, включенных на совпадение, позволяет вести эффективный поиск конверсионных электронов в диапазоне нескольких кэВ.

Авторы выражают благодарность А.И.Акатову за помощь в изготовлении отдельных узлов спектрометра.

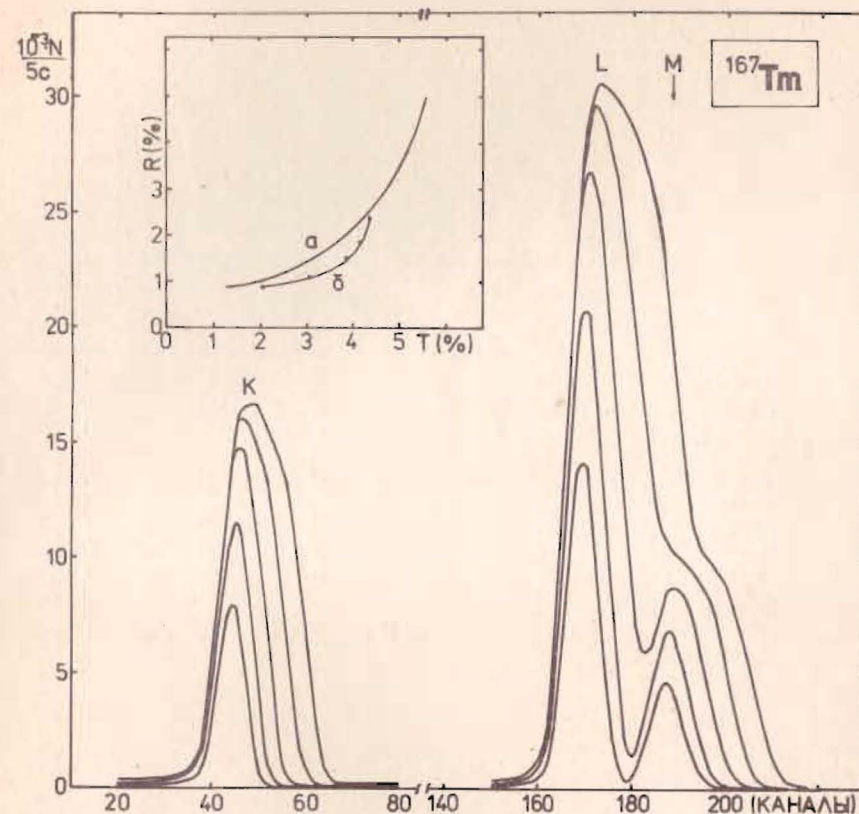


Рис.8. Участок спектра конверсионных электронов ^{167}Tm , снятый при различной величине щели выходной диафрагмы /табл.2/. Во вставке: зависимость разрешения бета-спектрометра от светосилы/см.текст/.

Таблица 2

Экспериментальные значения разрешения и светосилы МЛС ($25^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$)

| Номер К-линии на рис. 8 | Разрешение R (%) | Светосила T (%) | Размер выходной щели (мм) |
|-------------------------|------------------|-----------------|---------------------------|
| 1 | 0,9 | 2 | 1,25 |
| 2 | 1,1 | 3 | 2,0 |
| 3 | 1,5 | 3,8 | 3,0 |
| 4 | 1,8 | 4,1 | 4,0 |
| 5 | 2,4 | 4,3 | 5,0 |

ЛИТЕРАТУРА

1. Avignone F.T., Pinkerton J.E., Trueblood J.H. Nucl.Instr. and Meth., 1973, 107, p.453.
2. Westerberg L. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1975, 128, p.61.
3. Luontama M. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1979, 159, p.339.
4. Decman D.J. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1984, 219, p.523.
5. Spejewski E.H., Mlekodaj R.L., Carter H.K. Nucl.Instr. and Meth., 1981, 186, p.71.
6. Handschung L., Backe H., Bokemeyer H. Nucl. Instr. and Meth., 1979, 161, p.117.
7. Морозов В.А., Муминов Т.М. ОИЯИ, P13-3437, Дубна, 1967.
8. Gerholm T.R. Rev.Sci.Instr., 1955, 26, p.1069.
9. Gerholm T.R., Lindskog I. Ark.für Fys., 1963, 24, p.171.
10. Lindgren I., Schneider W. Nucl.Instr. and Meth., 1963, 22, p.48.
11. Lindgren I., Pettersson G., Schneider W. Nucl.Instr. and Meth., 1963, 22, p.61.
12. Winslow A.M. Journ.of Comp.Phys., 1966, 1, p.149.
13. Аленицкий Ю.Г., Ворожцов С.Б. ОИЯИ, 11-81-818, Дубна, 1981.
14. Абазов В.М., Савченко О.В. ОИЯИ, Б1-13-9782, Дубна, 1976.
15. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. "Наука", М., 1969.
16. Аликов Б.А. и др. ОИЯИ, 13-9844, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 апреля 1985 года.

Абазов В.М. и др.
Модернизация магнитно-линзового бета-спектрометра
для on-line экспериментов

P6-85-238

Описывается магнитно-линзовый бета-спектрометр типа Герхоляма, приспособленный для работы в режиме on-line с масс-сепаратором, установленным на пучке протонов фазотрона ОИЯИ. Описан способ вычисления значений индукции магнитного поля в области спектрометра, траекторий и формы линий конверсионных электронов. Вычисленные значения магнитной индукции спектрометра согласуются с экспериментально измеренными при помощи датчика Холла в пределе 4%. На основе вычисленных углов поворота траекторий электронов и фотографий следов электронов построены винтовые диафрагмы для подавления позитронного фона, пропускающие 93% электронов, выделяемых кольцевыми диафрагмами. На основе экспериментальных и вычисленных форм линий выделены три режима работы спектрометра с разрешением 2,5, 2, 1% и светосилой 5,4,3% соответственно.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Abazov V.M. et al.
Modernization of Magnetic Lens β -Ray Spectrometer
for On-Line Experiments

P6-85-238

The magnetic lens β -ray spectrometer of Gerholm type for on-line experiments with the mass-separator installed in the proton beam of "F" installation and intended for operation on-line with a mass-separator is described. The method for calculating the magnetic field induction values in the spectrometer volume is presented. The calculation values of spectrometer magnetic induction agree well with the experimental ones obtained by the Hall detector within approx.4% limit. According to the calculated trajectories and photography of electron tracks the helical baffles have been made which transmit 93% of the focused particles. The experimental and computer studies of the form of conversion electron lines permitted three regimes of spectrometer operation with 2,5; 2;1% resolution and 5;4;3% transmission, respectively.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985