

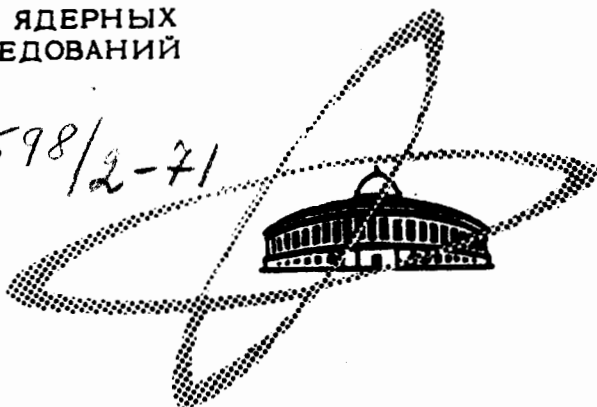
1/11-71

Б-865  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

598/2-71

13 - 5532



Б.Бочев, В.В.Каманин, Ф.Нормуратов,  
Ю.Ц.Оганесян, В.Г.Субботин

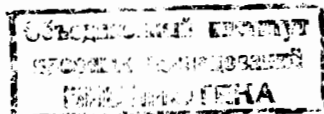
**ТРОХОИДАЛЬНЫЙ БЕТА-СПЕКТРОМЕТР  
С Si (Li) ДЕТЕКТОРОМ ЭЛЕКТРОНОВ**

13 - 5532

В.Вочев, В.В.Каманин, Ф.Нормуратов,  
Ю.Ц.Оганесян, В.Г.Субботин

**ТРОХОИДАЛЬНЫЙ, БЕТА-СПЕКТРОМЕТР  
С Si (Li) ДЕТЕКТОРОМ ЭЛЕКТРОНОВ**

Направлено в ПТЭ



Исследование ядер, далеких от полосы стабильности, для которых теория предсказывает новые интересные свойства, требует все большего сокращения времени от момента образования ядра до начала измерения. В этом направлении весьма перспективными являются эксперименты на пучке ускоренных частиц.

Для исследования электромагнитных переходов с возбужденных состояний ядер используются прежде всего полупроводниковые Ge (Li) детекторы и магнитные  $\beta$ -спектрометры. Недостатком последних является их одноканальность, что затрудняет измерения спектров короткоживущих изотопов. В последнее время большое развитие получили полупроводниковые Si (Li) детекторы для спектрометрии электронов. Лучшие образцы таких детекторов дают разрешение  $\approx 3$  кэВ, они являются многоканальными приборами, их эффективность приближается к геометрической для большого диапазона энергий, и это делает их способными выдержать конкуренцию с классическими  $\beta$ -спектрометрами. Однако при использовании Si (Li) полупроводниковых детекторов для измерений конверсионных электронов появляется проблема их защиты от рентгеновского и гамма-излучения источника. Если же детектор применяется для измерений на пучке заряженных частиц, то вопрос

защиты от фоновых излучений становится еще более существенным. Эту проблему можно решить, используя специальное магнитное поле для транспортировки электронов к детектору. Магнитное поле должно иметь высокую эффективность транспортировки электронов на значительное расстояние от источника в широком диапазоне энергий для обеспечения надежной защиты детектора.

Нами построен трохоидаальный  $\beta$ -спектрометр с полупроводниковым Si (Li) детектором электронов. Магнитное ведущее устройство транспортирует их по дуге  $180^\circ$  на расстояние 40 см от источника. Эта система источник-детектор оказывается весьма удобной, так как позволяет создать эффективную защиту детектора от всех фоновых излучений источника. Ввиду низкого фона, высокой эффективности для широкого энергетического диапазона, многоканальности и хорошего разрешения этот прибор может быть очень удобным и полезным для исследования распада короткоживущих изотопов и изомеров, а также мгновенного излучения ядер, образующихся в реакциях на пучке заряженных частиц.

## II. Движение заряженной частицы в транспортирующем магнитном поле

Трохоидаальное движение электронов в сильном и неоднородном магнитном поле с радиальной зависимостью  $B \approx 1/r^n$  впервые рассмотрел Тибо <sup>/1/</sup>. Для этого движения характерно: а) разделение позитронов и электронов, б) большая светосила и в) почти полное отсутствие энергетического разрешения. Мальмфорс <sup>/2/</sup>, однако, заметил, что, используя технику измерений по времени пролета, можно измерять скорость электронов (позитронов) и тем самым определять их энергию. Прибор, который им построен, при светосиле 0,2% дает энергетическое разрешение 2%. Уотсон <sup>/3,4/</sup> для регистрации энергии электронов использовал Si (Li) детектор. При разрешении 3 кэВ он получил светосилу  $\approx 5\%$  для диапазона энергий электронов от 0 до 600 кэВ.

Аллан <sup>/5/</sup> дает описание аналогичного прибора с энергетическим разрешением  $\approx 6\%$  и светосилой  $\approx 20\%$  для диапазона от 100 до 1000 кэВ.

Мальмфорс <sup>/6/</sup>, используя метод возмущений, развитый в <sup>/7/</sup>, подробно рассматривает движение электрона в сильном неоднородном магнитном поле с осевой симметрией и радиальной зависимостью  $1/r^n$ . Это движение является суперпозицией трохоидаального движения и осцилляции относительно плоскости симметрии.

Трохоидаальное движение обусловлено спадом напряженности магнитного поля по радиусу (см. рис. 1а). Если  $B_{-x} > B_{+x}$ , то после одного оборота электрон перемещается на расстояние  $d$  по оси  $y$ . Передвижение позитрона по абсолютной величине будет то же самое, но в обратном направлении. Отсюда видно, что это магнитное поле обладает свойством разделения направления движения позитронов и электронов. Дрейф электрона относительно плоскости симметрии представляет собой движение по пространственной спирали вдоль магнитных силовых линий (рис. 1в). Так как магнитные силовые линии в рассматриваемом поле по мере приближения к полюсам становятся сильно сходящимися, то взаимодействие радиальной составляющей магнитного поля с  $v_{\perp}$  приводит к уменьшению  $v_{\parallel}$ . В некоторой точке  $Z_r$  эта компонента становится равной нулю и меняет свой знак, происходит отражение электрона. Это так называемый "эффект зеркала".

Условие отражения имеет вид:

$$\sin \theta_0^c \geq \left( \frac{B_0}{B_r} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\theta_0^c$  - угол между направлением вылета электрона и осью  $Z$ , с которого начинается отражение,  $B_0$  - напряженность поля в точке вылета и  $B_r$  - напряженность поля в точке отражения. На рис. 1б

показана область захвата электронов магнитным ведущим полем для точечного источника, расположенного в плоскости симметрии. Все электроны, испущенные этим источником и движущиеся между двумя конусами утечки, транспортируются вокруг полюсных наконечников.

Светосила прибора определяется отношением поверхности сферического пояса к поверхности сферы единичного радиуса:

$$T = \frac{\int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \sin \nu \, d\nu \, d\phi}{4\pi} = \sin \Phi \quad (2)$$

Из (1) и (2) получается:

$$T^2 = \sin^2 \Phi = \cos^2 \theta_0^c = 1 - \sin^2 \theta_0^c = 1 - \frac{B_0}{B_r} \quad (3)$$

С точностью до второго члена  $\frac{B_0}{B_r} = 1 - \frac{n Z_r^2}{2R^2} + \dots$ , с учётом (3) получается выражение для светосилы:

$$T = \frac{n Z_r}{\sqrt{2}R} \quad (4)$$

$Z_r$  практически определяется расстоянием между полюсными наконечниками,  $R$  - радиус магнитной проводящей системы. Интересно отметить, что светосила не зависит от энергии электронов, а только от градиента магнитного поля  $n$  и геометрических размеров камеры прибора.

Угловое передвижение электрона после одного оборота дается выражением

$$\phi = \pi n \frac{\rho_0^2}{R^2} \left\{ 1 + \left( \frac{3}{4} n^2 + n - 1 \right) \frac{\rho_0^2}{R^2} + \dots \right\}, \quad (5)$$

где  $\rho_0$  - средний радиус кривизны траектории электрона. Передвижение электрона по магнитной проводящей системе дается выражением  $d = R\phi$ .

Длина одной орбиты электрона выражается в виде

$$L = 2\pi \rho_0 \left\{ 1 + \frac{n^2 + 2n}{2} \frac{Z_r^2}{R^2} + \dots \right\} \quad (6)$$

Особый интерес представляет выражение, дающее время пролета электрона на угол  $\pi$  вокруг полюсных наконечников:

$$\tau_\pi = \frac{\pi e}{mc^2} \frac{B_0 R^2}{n} \frac{1 + E}{E(1 + E/2)} \left\{ 1 + \frac{n(n-2)}{4} \frac{Z_r^2}{R^2} + \dots \right\} \quad (7)$$

Передвижение электрона за одну осцилляцию относительно плоскости симметрии имеет вид

$$\Lambda = \frac{2\pi}{R} \frac{mc}{eB_0} [E(1 + E/2)]^{1/2} \left\{ 1 - \frac{n^2 - 8n + 1}{16} \frac{Z_r^2}{R^2} + \dots \right\} \quad (8)$$

В последних двух выражениях энергия электрона берется в единицах  $m_0 c^2$ .

### III . Описание прибора

Трохоидальный  $\beta$  -спектрометр, построенный нами, предназначен для экспериментов на пучке тяжелых ионов циклотрона У-200 (ЛЯР ОИЯИ). Общий вид прибора показан на рис.2. Пучок ускоренных тяжелых ионов подходит по касательной к магнитному ведущему устройству и проходит через мишень. Ток измеряется цилиндром Фарадея, который расположен далеко от рабочего объема прибора. Электроны от мишени

транспортируются к Si (Li) детектору, который хорошо защищен от всех фоновых излучений.

Для экспериментов на пучке изготовлено специальное устройство крепления мишени и двух поверхностно-барьерных детекторов для измерения угловых распределений продуктов реакций. Расстояние детекторов от мишени можно менять от 2 до 8 см, а положение относительно направления пучка - от  $20^\circ$  до  $360^\circ$ . Под углом  $25^\circ$  на расстоянии 12 см от мишени находится мониторный детектор.

Для работы в режиме "off line" эта система заменяется шлюзом, который позволяет вставлять источники в работающий прибор за время меньше 2 мин.

Si (Li) детектор можно установить на углы  $\pi/2$  и  $\pi$  от мишени. В первом варианте фоновые условия ухудшаются.

### III -1. Магнитная система

Магнитная система выполнена на базе серийного поворотного магнита СП-46. Ток питания обмоток магнита регулируется плавно от 2,5 а до 35 а, и поддерживается стабильность магнитного поля  $\approx 10^{-3}$ . Рабочий ток выбран равным 30 а, когда насыщение магнитного сердечника уже почти полное. Профиль специально изготовленных полюсных наконечников и радиальный профиль магнитного поля в плоскости симметрии для разных значений тока в обмотках магнита показаны на рис.3. Градиент магнитного поля определен экспериментально при использовании соотношения

$$n = - \frac{\lg B_1 - \lg B_2}{\lg R_1 - \lg R_2} \quad (9)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  - два разных значения радиуса, а  $B_1$  и  $B_2$  - соответствующие им напряженности поля. Радиальная зависимость  $n$  для различных значений тока показана на рис.3.

В нашем случае рабочая точка выбрана на расстоянии 1 см от края полюсных наконечников. При токе 30 а в обмотках магнита в рабочей точке  $R = 19,7$  см получены  $B_0 = 5660$  гс и  $n = 5,75$ . Для выбранной нами рабочей точки теоретическое значение эффективности  $T = 0,33$ .  $Z_r$  - амплитуда осцилляции относительно плоскости симметрии практически определяется вертикальным размером камеры, который в нашем случае равен 3,2 см.

На рис.4 показаны расчетные величины, характеризующие движение электрона в нашем приборе. Значения  $\rho_0$  взяты из [8],  $d$  рассчитано по (5), время пролета - по (7) и общая длина траектории - по формуле  $l = \frac{\pi RL}{d}$ , где  $R = 19,7$  см.

Исследовано распределение транспортируемых от источника до детектора электронов по сечению пучка при помощи фотопластинки. Полученное изображение показывает, что для плоского источника  $^{137}\text{Cs}$  с диаметром 0,2 см электроны фокусируются в довольно резко ограниченную полосу шириной  $\approx 0,5$  см и высотой  $\approx 3$  см.

Абсолютная эффективность спектрометра для плоских источников определена экспериментально. Используемые источники прокалиброваны абсолютно по  $\gamma$ -активности на Ge (Li) спектрометре с точностью 2% для  $^{137}\text{Cs}$  и 5% для  $^{109}\text{Cd}$  и  $^{207}\text{Bi}$ . Они представляют круглые пятна диаметром 0,2 см на металлизированном майларе ( $0,8 \text{ мг/см}^2$ ) с диаметром оправки 2 см. Экспериментальная кривая абсолютной эффективности  $\sigma$  показана на рис.5. Так как рабочая поверхность детектора всего  $0,78 \text{ см}^2$ , то фактически на него падает  $\approx 20\%$  транспортируемых электронов. Геометрия используемых плоских источников не позволяет транспортировку со всего сферического пояса. Нельзя пренебречь

и эффектом обратного рассеяния падающих электронов от поверхности детектора, в результате которого они отдают лишь часть своей энергии. Поэтому итоговая эффективность в нашем случае составляет примерно 1/16 от теоретической эффективности захвата электронов магнитным транспортирующим устройством для диапазона энергий от 50 до 650 кэВ.

На рис.6 показана зависимость эффективности от радиального положения источника. Интересно отметить симметричность этих кривых и увеличение полуширины с энергией электронов. Вертикальная зависимость эффективности (рис.7) взята из <sup>4/</sup>. Это расчетная кривая, где  $Z_s = 1$  см. На основании характера этих двух зависимостей можно судить об оптимальных размерах источника (пучка). В основном эти размеры определяются радиальной зависимостью, где спад более крутой. Видно, что оптимальный диаметр источника (пучка) должен быть порядка 3-4 мм. Зависимость эффективности от тока в обмотках магнита для разных энергий электронов измерена и приведена на рис.8. Видно, что  $\sigma$  является плавной функцией от тока и стабильность магнитного поля  $\approx 10^{-3}$  вполне достаточна для стабильной работы прибора.

### III-2. Детектор и электроника

Спектрометром электронов является Si (Li) детектор, изготовление которого описано в <sup>9/</sup>. Диаметр активной зоны - 1 см, глубина дрейфа лития - 0,15 см. Детектор помещается в специальную оправку, которая обеспечивает хороший тепловой контакт с хладопроводом. Контакт с поверхностным слоем золота осуществлен при помощи серебряной пасты (рис.9).

Разрешение детектора сильно зависит от температуры. Для каждого детектора существует оптимальная температура и напряжение

обратного смещения, при которых получается наилучшее разрешение. С понижением температуры, как правило, увеличивается оптимальное напряжение обратного смещения. Эти зависимости измерены для нескольких детекторов. Для одного из лучших детекторов на рис.10 приведена зависимость энергетического разрешения от температуры при оптимальном смещении.

Сигнал от детектора подается на низкошумящий зарядочувствительный предусилитель (ЗПУ) <sup>9/</sup>. Первый зарядочувствительный каскад с полевым транзистором находится в вакуумной камере непосредственно у Si (Li) детектора. Исследована зависимость разрешения ЗПУ от охлаждения полевого транзистора. При постоянной оптимальной температуре и смещении Si (Li) детектора измерена зависимость полуширины пика генератора точных амплитуд от температуры полевого транзистора в интервале от +10°C до -160°C (рис.10). На рис.9 показана блок-схема электроники. Сигнал от ЗПУ подается на усилитель УСТ-3 и после усиления и формирования - на 4096-канальный амплитудный анализатор "Интертехник".

В качестве примера, показывающего возможности прибора, приведен спектр электронов внутренней конверсии, возникающих при распаде <sup>137</sup>Cs. Энергетическое разрешение для К-линии перехода 661,6 кэВ составляет 3,5 кэВ, и L-и M-линии этого перехода хорошо разделяются.

### III-3. Система охлаждения и регулировки температуры

Система охлаждения типа криостат показана на рис.9. В качестве охладителя используется жидкий азот. При вакууме  $\approx 5 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст. средняя скорость охлаждения детектора  $\approx 1,2$  градус/мин и минимальная температура - 160°C. Г-образный хладопровод представляет собой

медный стержень диаметром 2,2 см, верхнее плечо которого разделено на 2 части – для детектора и полевого транзистора, что позволяет производить независимую регулировку их температуры. Хладопровод находится в тонкостенной трубке из нержавеющей стали.

Температура детектора и полевого транзистора измеряется термопарой медь-константан, снимаемое напряжение контролируется прибором ЭПП-09. Непосредственно у детектора и полевого транзистора в хорошем тепловом контакте с хладопроводом для дополнительного подогрева находятся нагреватели ( $\approx 40$  ом). Принцип работы системы стабилизации температуры виден из рис. 9. Эта система позволяет поддерживать любую температуру, от  $+10^{\circ}\text{C}$  до  $-160^{\circ}\text{C}$ , с точностью лучше чем  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  в течение длительного периода времени.

#### III-4. Вакуумная система

В камере прибора создается вакуум  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. Для нормальной работы Si(Li) детектора требования к чистоте вакуума чрезвычайно высокие. Стандартные азотные ловушки масла к диффузионным насосам оказываются непригодными, так как их эффективность  $\approx 80\%$  и они не исключают миграцию масла. Единственно пригодными для этой цели оказываются насосы для безмасленной откачки типа турбомолекулярных или магнитных электроразрядных насосов с холодным катодом  $/10/$ .

Вакуумная система прибора показана на рис. 12. Форвакуумная часть состоит из ротационного насоса и азотной ловушки специальной конструкции, которая обеспечивает полное улавливание паров масла и исключает миграцию масла по стенкам. После получения вакуума  $(8-6) \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. откачка продолжается магнитным электроразрядным насосом НЭМ-300-1.

Все вакуумные уплотнения камеры безмасленные. На рис. 12 показан принцип безмасляного уплотнения движущихся деталей в приборе.

#### IV. Заключение

Построенный нами трохлоидальный  $\beta$ -спектрометр с полупроводниковым Si(Li) детектором обладает высоким энергетическим разрешением и большой эффективностью. Для области энергий электронов больше 150 кэВ разрешение практически постоянно и составляет 3,5 кэВ. В интервале от 50 до 650 кэВ абсолютная эффективность заметно не зависит от энергии электронов и составляет 2% от  $4\pi$ .

Большим достоинством прибора является его многоканальность. Разделение электронов и позитронов делает его удобным для измерения спектров электронов внутренней конверсии позитронных излучателей.

Этот прибор с успехом можно применить для экспериментов, основанных на использовании различных временных соотношений между испусканием электрона и другими ядерными событиями. К таким экспериментам относятся, например, изучение электронов внутренней конверсии, возникающих в ядерной реакции,  $e^+ - \gamma$  совпадения, совпадения между  $\alpha$ -распадом и электронами внутренней конверсии последующих ядерных переходов.

Этот прибор позволяет производить одновременное измерение спектра электронов внутренней конверсии и  $\gamma$ -лучей ядра, что очень удобно при определении мультипольностей электромагнитных переходов ядер.

Авторы выражают глубокую благодарность академику Г.Н.Флерову за постоянный интерес и содействие, С.А.Карамяну за ценные советы.



Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность В.А.Чугрееву и В.Г.Барабанову за помощь при конструировании камеры, В.Н.Покровскому за высококачественное выполнение механических работ, А.Г.Пилькову и П.И.Ульянову за помощь в изготовлении деталей прибора, Б.В.Шитову, С.Илиеву и В.М.Плотко за помощь в сборке и наладке прибора, А.Н.Филипсону, В.А.Альперту и Н.М.Уткину за консультации по наладке вакуумной системы, В.Ф.Кушнируку за изготовление Si(Li) детектора, К.И.Семинову, Е.А.Минину и А.Д.Лебедеву за разработку и изготовление системы стабилизации тока магнита.

#### Литература

1. J. Thibaud, Phys.Rev., 45, 781 (1934).
2. K.G.Malmfors and A. Nilsson, Arkiv Fysik., 13, 247 (1958).
3. R.L.Watson, A Study of the Internal Conversion Electrons Emitted within Three Nanoseconds after the Spontaneous Fission of  $^{252}\text{Cf}$  UCRL-16797 (1966).
4. R.L.Watson, J.O.Rasmussen, H.R.Bowman and S.G.Thompson. Rev.Sci.Instr., 38, 905 (1967).
5. C.J.Allan. Nucl.Instr.Meth., 85, 181 (1970).
6. K.G.Malmfors. Arkiv Fysik., 13, 237 (1958).
7. H. Alfvén. Arkiv Mat. Astr.Fys., 27A, No 22 (1940).
8. F.W.Breivogel and M.D.Holtz. Table of Kinetic Energy vs. Magnetic Rigidity for Electrons, UCRL-10494 (1962).
9. Бачонэ, В.Ф.Кушнирук, В.Г.Субботин, З.А.Тер-Акопьян, Ю.П.Харионов, Зо Сен Сам. Препринт ОИЯИ, P13-3718, Дубна, 1968.
10. Ю.А.Карпов, Е.И.Контор, О.Н.Таленский. ПТЭ, №2, 5 (1964).

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 декабря 1970 года.

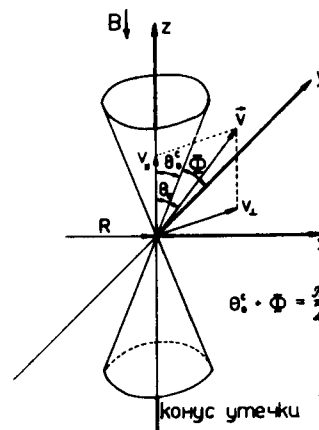
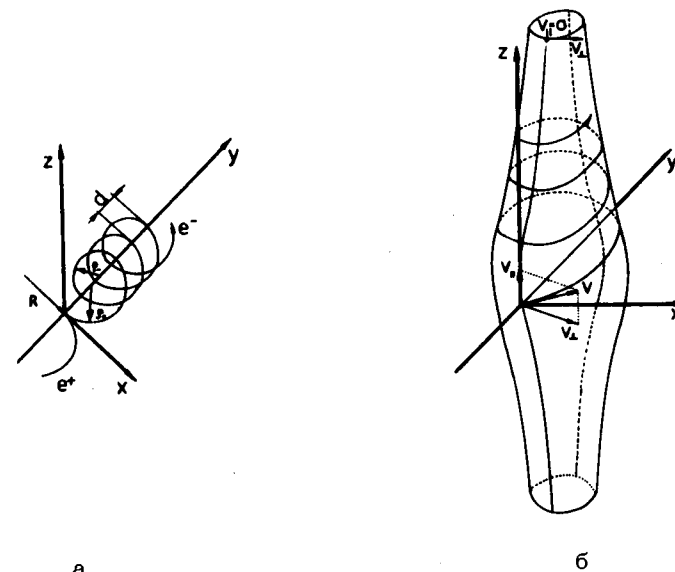


Рис.1 Магнитное поле  $B$ , параллельное оси  $Z$ .

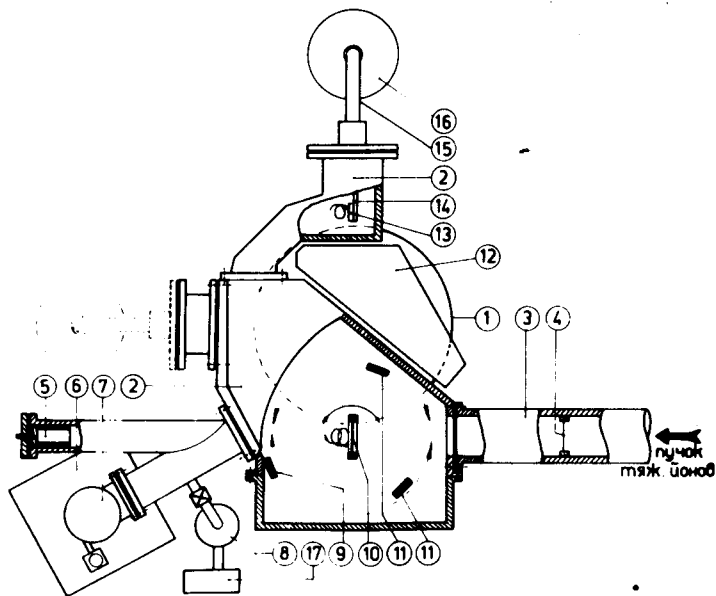


Рис. 2. Общий вид прибора. 1- полюсные наконечники; 2 - камера; 3 - ионопровод; 4 - фольга, отделяющая вакуумный объем прибора от вакуумного объема ускорителя У-200; 5 - цилиндр Фарадея; 6 - насос НЭМ-300-1; 8 - азотная ловушка; 9 - мониторинг поверхностно-барьерный детектор; 10 - мишень; 11 - поверхностно-барьерный детектор; 12 - защита; 13 - полупроводниковый Si(Li) детектор электронов; 14 - хладопровод; 15 - рубашка хладопровода; 16 - сосуд Дьюара; 17 - форвакуумный насос.

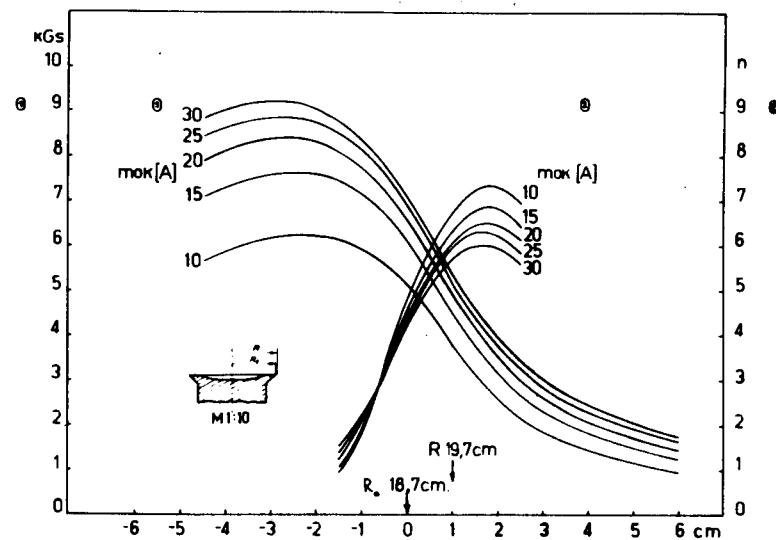


Рис. 3. Профиль полюсных наконечников. Радиальный профиль магнитного поля и градиент магнитного поля.

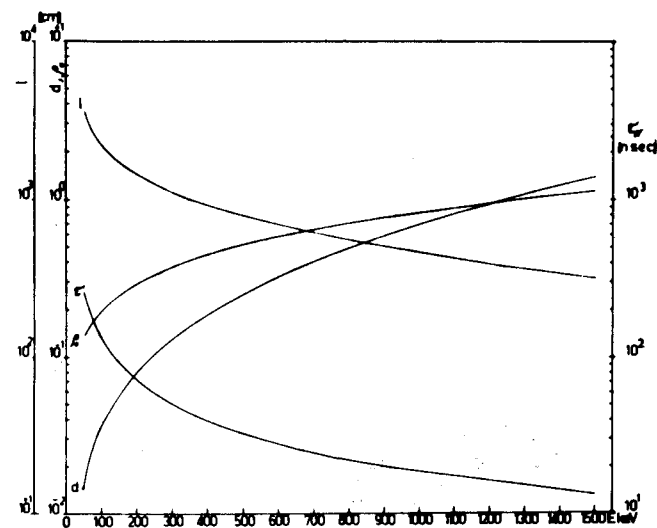


Рис. 4. Расчетные зависимости  $\rho_0$ ,  $d$ ,  $l$ ,  $\tau_\pi$  от энергии электронов.  $B_0 = 5600$  гс,  $n = 5,75$ ,  $R = 19,7$  см.

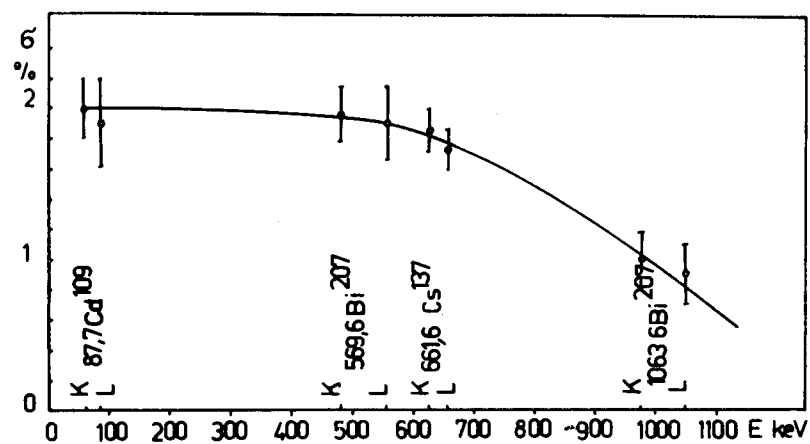


Рис. 5. Экспериментальная кривая абсолютной эффективности.

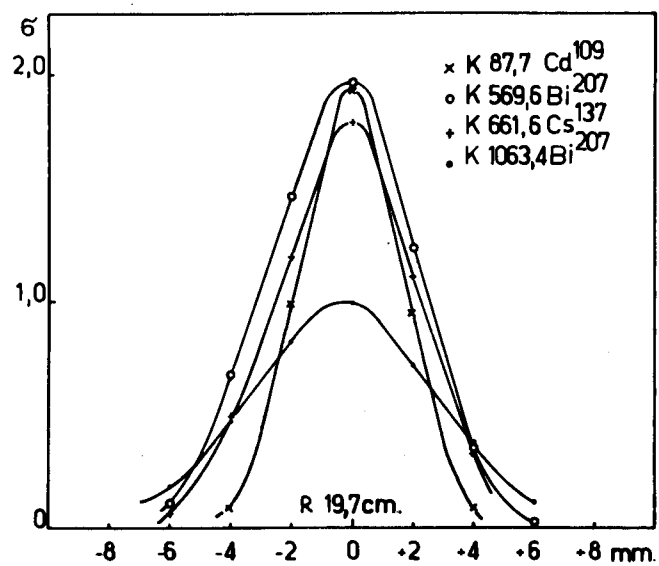


Рис. 6. Радиальная зависимость эффективности для разных значений энергий электронов.

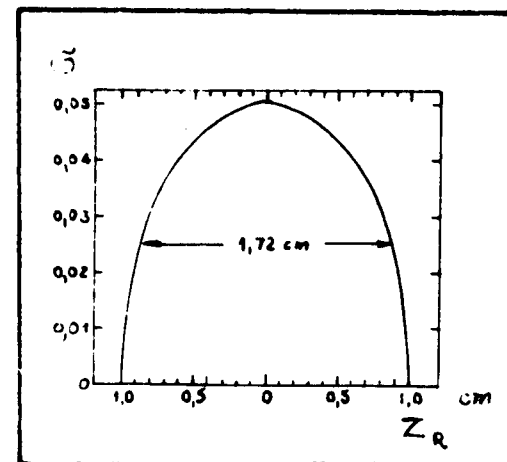


Рис. 7. Расчетная вертикальная зависимость эффективности /4/.

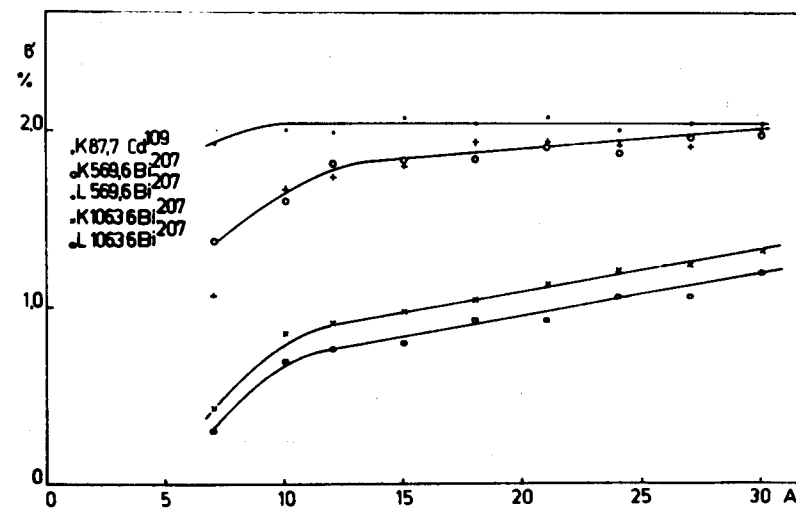


Рис. 8. Зависимость эффективности от тока в обмотках магнита.

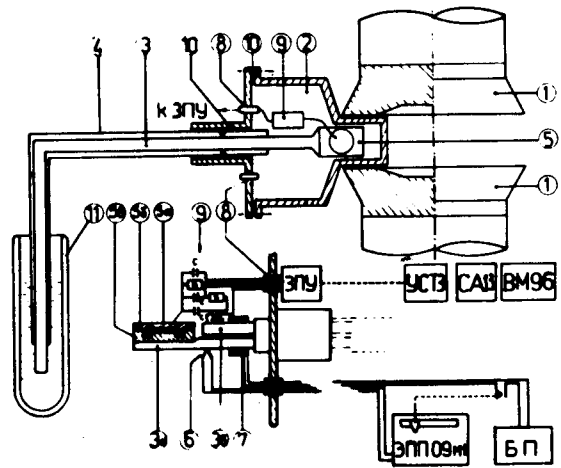


Рис.9. Схема системы охлаждения и стабилизации температуры детектора и полевого транзистора и блок-схема электроники: 1 - полюсные наконечники; 2 - камера; 3 - хладопровод (3а - хладопровод детектора, 3б - хладопровод полевого транзистора); 4 - вакуумная рубашка хладопровода; 5 - детектор с оправкой (5а - полупроводниковый Si (Li) детектор, 5б - тефлон, 5в - медная оправка); 6 - термопара; 7 - нагреватель; 8 - вакуумный разъем; 9 - первый каскад ЗПУ; 10 - вакуумное уплотнение; 11 - дьюар с жидким азотом, БП-блок питания нагревателей, СА13 и ВМ96 - 4096-канальный амплитудный анализатор "Интертехник".

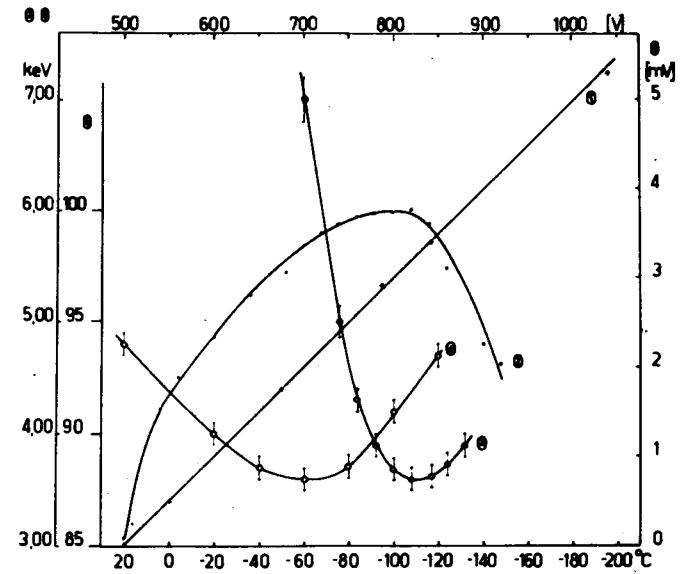


Рис.10. 1 - калибровка термопары; 2 - зависимость разрешения полевого транзистора от температуры (2 N3823 TEXAS INSTRUMENTS) /относительные единицы/; 3 - зависимость разрешения Si (Li) детектора от температуры при оптимальном смещении; 4 - зависимость разрешения Si (Li) детектора от напряжения обратного смещения,  $t_{дет.} = -115^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{пол.тр.} = -95^{\circ}\text{C}$ .

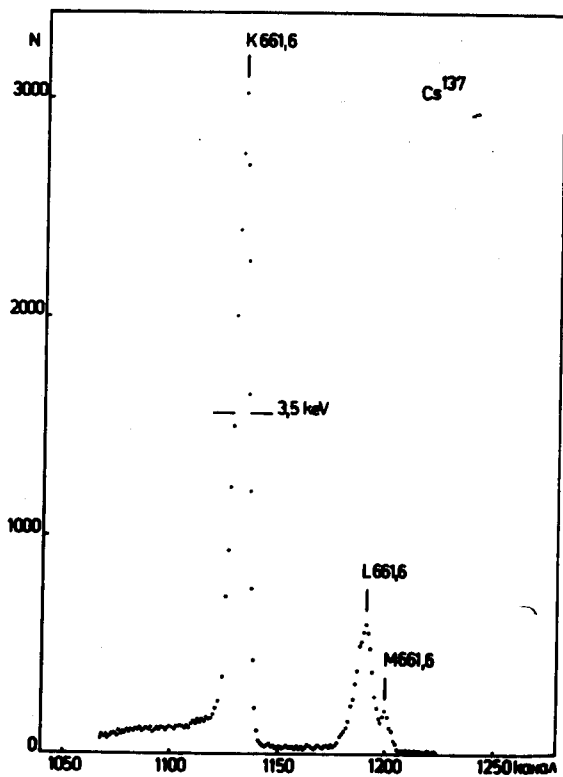


Рис.11 . Спектр электронов внутренней конверсии  $^{137}\text{Cs}$  .

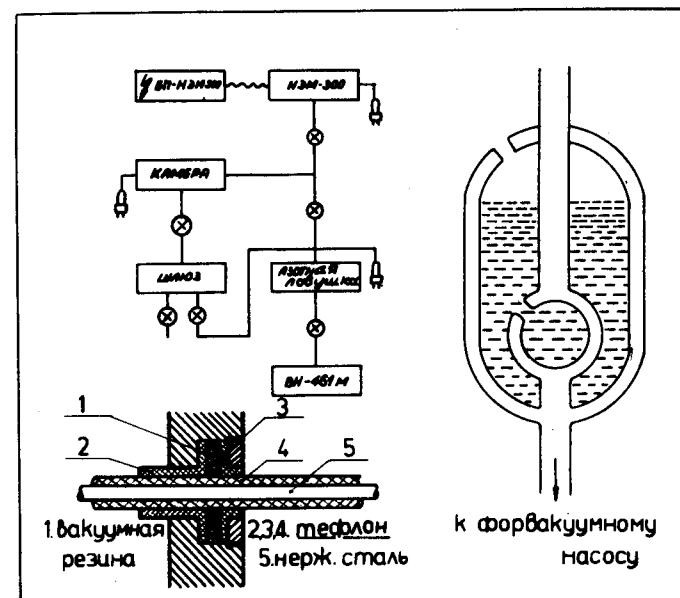


Рис.12 . Схема вакуумной системы.

Слева внизу - принцип безмасленного уплотнения движущихся деталей, справа - профиль азотной ловушки.