

С 344.1

Д-721

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

3- 3637

М.Н.Дражев

**СПЕКТРОМЕТР БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ
ПО ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА В НАНОСЕКУНДНОМ
ДИАПАЗОНЕ**

260. Приборы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Дубна 1968

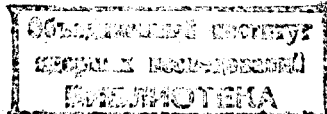
3- 3637

М.Н.Дражев

СПЕКТРОМЕТР БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ
ПО ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА В НАНОСЕКУНДНОМ
ДИАПАЗОНЕ

260. Приборы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук



5027 бр.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики
Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
кандидат технических наук

А.А.ТЯПКИН
А.В.КУЦЕНКО

Ведущее предприятие:

Институт атомной энергии им.Курчатова

Автореферат разослан " " _____ 1968 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1968 г.
на заседании Объединенного Ученого совета Лаборатории
нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ
г.Дубна, Московской области, Объединенный институт
ядерных исследований, конференц-зал Лаборатории
ядерных реакций

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке.

Ученый секретарь совета

Ю.Т.ЧУБУРКОВ

Введение

Одна из основных задач исследования ядерных взаимодействий, в которых наблюдается вылет нейтронов, - определение энергии последних. Из изучения нейтронных спектров может быть получена информация о спинах, четностях и энергиях уровней ядер.

Непосредственным методом спектрометрии быстрых нейтронов является определение их энергии по времени пролета. Использование этого метода связано в первую очередь с решением специфических проблем наносекундной ядерной электроники, и в последние годы число опубликованных методических работ в этой области непрерывно растет.

В реферируемой диссертации рассмотрен ряд вопросов этой методики, связанных с исследованием основных параметров спектрометрических установок, с развитием их структуры, с улучшением их характеристик, а также приведен анализ и описание элементов созданного в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ спектрометра по времени пролета в качестве примера возможного решения.

Диссертация отражает работы автора в этом направлении и состоит из введения, восьми глав, заключения и приложения, содержание которых излагается ниже.

I. Общие вопросы спектрометрии по времени пролета

Исходя из необходимости систематизации и определения основных понятий время-пролетной методики, в первой главе диссертации рассмотрены физические основы спектрометрии по времени пролета, основные характеристики спектрометрических установок и их обобщенная структура.

Определение энергии нейтронов по времени пролета сводится к измерению времени, прошедшего с момента вылета нейтрона из некоторой начальной точки (появление сигнала "старт") до момента его регистрации в конце определенного пролетного расстояния (получение сигнала "стоп"). Независимо от метода получения сигнала "старт" (использование рассеяния нейтронов в кристалле детектора "старт"; регистрация сопровождающих вылет нейтронов излучений; применение импульсного источника нейтронов), основными элементами спектрометров по времени пролета (СВП) являются:

1. Детектор нейтронов и устройство (или детектор) получения сигнала "старт";

2. Устройство для измерения коротких временных интервалов и накопления информации (система временного анализа);

3. Вспомогательные системы (например, система спектрометрирования энергии сопровождающих частиц, система дополнительного время-амплитудного отбора, система калибровки и контроля и т.д.).

Общая структура СВП определяется спецификой экспериментов и особенностями и степенью развития вышеперечисленных систем. В целом, СВП могут быть охарактеризованы следующими основными параметрами: временное разрешение, энергетическое разрешение, разрешение по вспомогательным спектрометрическим каналам, эффективность, рабочие диапазоны, динамический диапазон, линейность, быстродействие, стабильность (влияние температуры, напряжения питания и т.д.).

2. Детекторы СВП

В настоящее время в СВП используются преимущественно органические сцинтилляторы в сочетании с фотоумножителями для "временных" измерений. Сцинтилляционные детекторы обеспечивают сравнительно высокое временное разрешение, достаточную эффективность и малое мертвое время, но их амплитудное разрешение является неудовлетворительным.

Основными факторами, определяющими временное разрешение сцинтилляционных детекторов, является величина отношения конверсионной эффективности сцинтиллятора к его времени высвечивания и временная неопределенность, связанная с применяемыми ФЭУ. Уменьшение последней и получение хорошего отношения сигнал-шум становится возможным при помощи установки, содержащей источники эталонных световых импульсов наносекундной длительности и позволяющей подбирать оптимальные значения рабочих напряжений всех электродов ФЭУ.

Используемые в СВП ЛНФ индивидуально подобранные делители ФЭУ значительно отличаются от паспортных, и для них характерно прогрессивное нарастание междинодных потенциалов с приближением к аноду. С целью улучшения стабильности ФЭУ "старт" и "стоп" можно питать от одного источника, чтобы компенсировать возникающие из-за его нестабильности временные сдвиги. Для формирования сигналов от ФЭУ в СВП использовалось "быстрое" пересечение нуля (с дифференцированием и последующим сложением задержанного и инвертированного сигнала).

Применение полупроводниковых детекторов в СВП (высокое амплитудное разрешение которых позволяет спектрометрирование энергии сопровождающих частиц) пока ограничено, главным образом, из-за

малого уровня их сигналов. Для получения высокого временного разрешения эти детекторы должны быть изготовлены из сравнительно низкоомного кремния, иметь небольшую площадь и толщину и выдерживать высокие рабочие напряжения.

Так как совмещение необходимого в этом случае большого коэффициента усиления с минимальным временем нарастания и оптимальными спектротрическими характеристиками трудно выполнимо, целесообразно разделять сигналы для амплитудного и временного анализа (в СВЧ ЛНФ для этой цели используется импульсный трансформатор) и усиливать их раздельно при помощи зарядочувствительного спектротрического и широкополосного маломощного усилителей^{/6,7/}. Реализация последнего из-за его большой добротности ($\Delta f_k \sim 10^{10} - 10^{11}$ Гц) связана с определенными трудностями.

Разработанный для СВЧ ЛНФ усилитель имеет коэффициент усиления 500 - 1000 при времени нарастания $6 \cdot 10^{-9}$ сек; зависимость коэффициента усиления от изменения температуры и напряжения питания - 0,03% /°C и $2 \cdot 10^{-3}$ /%; нелинейность при амплитуде выходных сигналов до 5в и нагрузке 75 ом - меньше 1%, а уровень шумов, приведенных к входу - $28 \cdot 10^{-6}$ в.

3. Временные анализаторы СВЧ в наносекундном диапазоне

В спектротрии по времени пролета в наносекундном диапазоне наибольшее распространение получили системы для временного анализа с преобразованием "время-амплитуда" аналогового типа благодаря их хорошим параметрам, простоте и удобству в эксплуатации. Их действие основано на подключении какой-то накопительно-удлинительной системы в течение измеряемого временного интервала t (принцип "старт-стоп") или $t - t$ (принцип "перекрытия

импульсов", где T - диапазонная константа) к некоторому источнику энергии при помощи быстродействующего ключевого устройства. Полученные импульсы с амплитудой, пропорциональной времени накопления и некоторой константе преобразования, усиливаются линейным усилителем и поступают в многоканальный амплитудный анализатор.

Так как в большинстве опубликованных работ описываются только конкретные преобразователи или эксперименты, то в третьей главе диссертации дан обзор главных направлений развития в этой области, приведены систематизация и определение их основных параметров (рабочий диапазон, константа преобразования, временное разрешение, линейность, чувствительность, амплитудная зависимость, температурная зависимость, зависимость от напряжения питания, максимальное число каналов, загрузочные характеристики) /2/.

Особенности обоих разработанных для СВЧ ЛНФ преобразователей следующие. Первый из них работает на принципе "старт-стоп" и в нем применена симметричная балансная система сложения ключевых импульсов; его рабочие диапазоны - 20, 50, $100 \cdot 10^{-9}$ сек, константа преобразования - 5, 2 и $1 \cdot 10^6$ в/сек без усилителя и 250, 100 и $50 \cdot 10^6$ в/сек с линейным усилителем; его чувствительность - $200 \cdot 10^{-3}$ в, интегральная нелинейность - меньше 0,3%, а аппаратное временное разрешение - $8 \cdot 10^{-12}$ сек или не хуже 0,05% (см. рис. 1)^{/5/}.

Второй преобразователь работает на принципе "перекрытия импульсов", имеет трехдиодную ключевую систему; в нем применены компенсирующие цепи для повышения линейности и быстродействия, и впервые^{/7/} использованы устройства нелинейного моделирования для точной компенсации амплитудной зависимости. Его рабочие

диапазоны 20, 60, $100 \cdot 10^{-9}$ сек; константа преобразования 5, 1,6 и $1 \cdot 10^6$ в/сек без усилителя и 200, 70, $40 \cdot 10^6$ в/сек с линейным усилителем и выходным формирователем; чувствительность - $200 \cdot 10^{-3}$ в, интегральная нелинейность меньше 0,5%, температурная зависимость - 0,004% /°C, аппаратурное временное разрешение около $9 \cdot 10^{-12}$ сек или не хуже 0,05%.

4. Вопросы калибровки систем временного анализа СВЧ

Для калибровки и исследования основных параметров СВЧ в наносекундном диапазоне применяются отрезки коаксиального кабеля, задержка которых определяется их геометрической длиной и скоростью распространения сигналов. Величина этих калибровочных задержек должна быть уточнена экспериментально, и для этой цели предложен активный частотный метод /4/, в котором исследуемая линия участвует как часть коаксиального резонатора автоколебательной системы. Измеряя частоту генерации цифровым кварцованным частотомером, возможно определять электрическую длину линии с высокой точностью.

Анализ погрешностей, вводимых дополнительными реактивными нагрузками на концах резонатора, затуханием линии, а также тем, что спектр частот импульсов может простирается выше, чем частоты измерений, показывает, что их величины незначительны.

Вследствие слабой связи колебательного четырехполюсника с усилительным, а также благодаря автоматически поддерживаемому коэффициенту усиления в последнем изменения параметров усилителя мало сказываются на точности измерений (напр., при изменении анодного напряжения на $\pm 10\%$ относительная ошибка не превышает 0,008%,

а при изменении напряжения накала на $\pm 10\%$ - 0,01%).

Так как использование отрезков кабеля для измерений и калибровки в пикосекундной области связано с определенными трудностями, предложена специальная измерительная линия с максимальным изменением задержки в $1000 \cdot 10^{-12}$ сек и точностью отсчета 10^{-12} сек. /3/ Анализ погрешности, вводимой её конечной проводимостью, показывает, что она не превышает 0,1%, а погрешность из-за температурного изменения длины линии и изменения величины диэлектрической проницаемости намного меньше.

Пример измерения малых временных интервалов в пикосекундном диапазоне при помощи переменной линии показан на рис.1, где отдельные пики получены путем изменения задержки в канале "стоп" преобразователя время в амплитуду через $20 \cdot 10^{-12}$ сек.

5. Вопросы компенсации амплитудной зависимости в СВЧ

Одним из основных недостатков систем для временного анализа, работающих в широком динамическом диапазоне амплитуд, является их амплитудная зависимость. Снижение порогов входных устройств и предварительное формирование входных импульсов (использование метода "пересечения нуля", дифференцирование или обострение нелинейными элементами) не позволяет в достаточной степени уменьшить её влияние в СВЧ.

Проведенный анализ и экспериментальные исследования показывают, что временная ошибка в преобразователях время-амплитуда, возникающая из-за конечного времени нарастания входных импульсов и конечного отношения величины порога к их амплитуде, при введении предложенной Беллом и Йоргенсоном

аппроксимации компенсационного сигнала линейным преобразованием входного импульса (для десятикратного динамического диапазона), имеет величину $0,5\tau$.

Использованием дополнительного сигнала суперпозиции эта ошибка может быть уменьшена до $0,31\tau$, а при помощи предложенных новых методов нелинейного моделирования компенсационного сигнала (напр., двойное логарифмирование входного импульса) становится меньше, чем $0,05\tau$. /8/

Так, при применении компенсации типа двойного логарифмирования величина смещения пиков в СВП не превышает $200 \cdot 10^{-12}$ сек (для десятикратного изменения амплитуды входных импульсов от полупроводникового детектора с временем нарастания $7 \cdot 10^{-9}$ сек).

В качестве примера на рис.2 приведен спектр нейтронов из реакции $T(d,n)He^4$, полученный при помощи полупроводникового детектора в канале "старт" без компенсации, и в случае применения компенсации нелинейного типа, позволяющей улучшить временное разрешение с $2,26 \cdot 10^{-9}$ сек до $1,04 \cdot 10^{-9}$ сек.

Использование предложенных методов точной компенсации в СВП позволит не только значительно уменьшить возникающую из-за амплитудной зависимости нелинейность, но и обеспечить в широком динамическом диапазоне временное разрешение, которое до сих пор удавалось получать только в сравнительно узких амплитудных интервалах.

6. Вопросы амплитудно-временного отбора и амплитудного анализа в СВП

Использование всего объема информации, которую можно получить от детекторных сигналов в СВП, предполагает не только анализ их временного распределения, но и отбор или анализ

информации по амплитудным признакам. Таким образом, работа СВП в целом в большой степени зависит от элементов его логической структуры, при помощи которых осуществляется дополнительный временно-амплитудный отбор и амплитудный анализ сопровождающих вылет нейтронов частиц.

Особенности этих элементов обусловлены спецификой работы СВП (напр., наличием больших нагрузок по входам, большими динамическими диапазонами и т.д.). В комплекс СВП ЛНФ входит ряд подобных унифицированных элементов, для которых приведен анализ и результаты их экспериментального исследования.

Высокостабильный линейный усилитель, используемый в преобразователях время-амплитуда и для усиления сигналов амплитудного отбора от детекторов, имеет время нарастания $30 \cdot 10^{-9}$ сек ($8 \cdot 10^{-9}$ сек); средний коэффициент усиления (50), который сохраняется при изменениях напряжения питания (± 12 в) на 1% или температуры от 20 до 40°C с точностью 0,01% и 0,2% соответственно. Интегральная нелинейность усилителя лучше 0,1%, а время восстановления при стократной амплитудной перегрузке импульсами длительности t - меньше $2t$.

Дифференциальный дискриминатор, применяемый вместе с линейным усилителем в каналах для амплитудного отбора в связи с широкими динамическими диапазонами имеет независимо регулируемые нижний и верхний пороги (от 0,5 до 5в или 0,01 до 0,1в ко входу усилителя), и величина их сохраняется при изменениях напряжения питания на 1%, температуры от 20° до 40°C, частоты следования от 10 до 10^5 имп/сек, а также и длительности входных импульсов от $30 \cdot 10^{-9}$ сек до $5 \cdot 10^{-6}$ сек с точностью 1% для каждого случая.

Схема совпадений, которая работает вместе с линейными усилителями и дифференциальными дискриминаторами, имеет 3 канала совпадений и 1 канал антисовпадений. Её временное разрешение ($300 \cdot 10^{-9}$ сек) выбрано заведомо больше максимального рабочего диапазона спектрометра. Амплитуда, время нарастания и длительность её выходных импульсов имеют величину 20в, $50 \cdot 10^{-9}$ сек и 10^{-6} сек соответственно, а максимальная частота следования по входам — больше 10^5 имп/сек.

Особое место среди элементов, входящих в комплекс для амплитудно-временного отбора, занимает линейная схема пропускания, являющаяся также частью спектрометрического тракта временного (или амплитудного) анализа. Её коэффициент передачи — 0,915 в открытом, $5 \cdot 10^{-5}$ в закрытом состоянии и сохраняется с точностью 0,8% при изменении температуры от 20 до 50°C; амплитуда pedestala — $2 \cdot 10^{-3}$ в, а интегральная нелинейность в диапазоне 0,2 — 6,0в — меньше 0,2%.

Зарядочувствительный предусилитель, используемый в амплитудно-спектрометрическом тракте, обеспечивает на входе основного спектрометрического усилителя около $200 \cdot 10^{-3}$ в/Мэв для α -частиц; его эквивалентная входная емкость — примерно $3000 \cdot 10^{-12}$ ф; изменение амплитуды выходных сигналов при изменении емкости детектора 0,03% / 10^{-12} ф.

Основной спектрометрический усилитель имеет коэффициент усиления 100, время нарастания — $40 \cdot 10^{-9}$ сек, интегральную нелинейность в диапазоне до 10в (на согласованный 100-омный кабель) $\pm 0,1\%$. При изменении температуры от 15° до 50°C и напряжения питания на 1% его коэффициент усиления сохраняется с точностью 0,08% и 0,03% соответственно, а время

восстановления при стократной амплитудной перегрузке импульсами длительности : имеет величину 2-3 .

7. Вспомогательные устройства СВЧ

Исследование и контроль основных параметров спектрометрических трактов СВЧ (линейность, стабильность и т.д.) предполагают наличие комплекса, который позволяет измерять амплитуды импульсов с точностью порядка 0,01% — 0,05%. Для этой цели разработаны высокостабильный генератор контрольных импульсов и измерительный экспандер, для которых приведены анализ и результаты их экспериментального исследования.

Особенностью генератора контрольных импульсов является блокинг-генератор, примененный в качестве насыщенного ключа, и наличие дополнительной стабилизации на его выходе. Амплитуда контрольных импульсов регулируется в диапазонах 10в, 0,1в. и $10 \cdot 10^{-3}$ в с шагом изменения 0,01 и сохраняется постоянной при изменениях температуры от 15° до 45°C или напряжения питания (± 12 в) на 1% с точностью $3,5 \cdot 10^{-4}$ и $8 \cdot 10^{-5}$, соответственно.

Амплитуда измеряемых сигналов определяется сравнением (точность сравнения 0,02%) с высокостабильным порогом экспандера (0 — 10в), сохраняющимся при изменении напряжения питания на 1% или температуры от 20° до 40°C — с точностью лучше 0,02%. Коэффициент передачи — 0,97, а максимальная величина сигнала на выходе, когда амплитуда входных импульсов меньше величины порога, составляет меньше 10^{-3} в. Измерительный экспандер в сочетании с линейным усилителем используется в СВЧ и для "растяжения" исследуемых спектров.

В число вспомогательных устройств СВП включены также линейные инверторы, позволяющие изменять полярности сигналов логических элементов СВП; блоки стабилизированного питания, в которых напряжение на выходе (± 12 в) при изменении напряжения сети на $\pm 10\%$ и при изменении температуры от 20° до 40° сохраняется с постоянством 0,03% и 0,27% соответственно, их внутреннее сопротивление - 0,05 ом, а напряжение фона и шума - $0,5 \cdot 10^{-3}$ в; симметричные аттенуаторы с шагом 0,8 дБ и 4 дБ, с характеристическим сопротивлением 75 и 150 ом, которые необходимы для согласования уровней сигналов и для исследования и настройки элементов СВП.

8. Общие характеристики спектрометра по времени пролета ЛНФ и экспериментальные результаты

Структура спектрометра по времени пролета ЛНФ в случаях, когда сигнал "старт" получается при помощи детектирования сопровождающих вылет нейтрона излучений сцинтилляционным детектором, может быть представлена согласно рис.3.

Здесь сигналы временного анализа от детектора нейтронов "5" и сопровождающих излучений "2" после их предварительного формирования устройствами "6" и "3", через калибровочный блок задержек "8" поступают в формирователи "9" и "11" преобразователя времени в амплитуду "10". Сигналы для амплитудного отбора с устройств формирования "7" и "4" через линейные усилители "13" и "16" подаются в дифференциальные дискриминаторы "17" и "20", и когда их амплитуда отвечает выбранным порогам, схема совпадений "21" открывает линейную схему пропускания "23", через которую информация от линейного усилителя "12" преобразователя

поступает в многоканальный амплитудный анализатор "24". К схеме совпадений подключается также пересчетное устройство "22".

Когда в СВП для получения сигнала "старт" используется полупроводниковый детектор, становится возможным проведение двухмерного анализа (анализ энергии нейтронов по времени пролета и анализ энергии сопровождающих заряженных частиц), и структура спектрометра может быть представлена, как это показано на рис.4.

Здесь сигналы для временного анализа от сцинтилляционного детектора нейтронов "8" (после их предварительного формирования в "9") и от полупроводникового детектора "1" через калибровочный блок задержек "11" и, соответственно, через разделительный трансформатор "2", обе секции широкополосного усилителя "3" и "4", инвертирующий трансформатор "5" поступают в формирователи "12" и "6" и в устройства компенсации амплитудной зависимости "13" и "7" преобразователя времени в амплитуду "14". Дополнительный амплитудно-временной отбор осуществляется при помощи линейных усилителей "18", "20" и "21"; дифференциальных дискриминаторов "22", "24", "25" и схемы совпадений "26", управляющей линейными схемами пропускания "17" и "31". Через "17" сигналы от линейного усилителя "15" преобразователя (после их формирования в "16"), а через "31" - сигналы от зарядочувствительного предусилителя "28" и спектрометрического усилителя "30" поступают в систему двухмерного анализа "34".

Исследования основных характеристик СВП ЛНФ (напр., интегральная и дифференциальная нелинейность, температурная зависимость, влияние напряжения питания и т.д.) проводились при помощи источника Co^{60} регистрацией $\gamma\gamma$ совпадений и введением необходимой калибровочной задержки в нейтронном канале.

Таким образом, с хорошим приближением имитируются некоторые условия эксперимента (работа двух детекторов с учетом времен пролета электронов в ФЭУ, временного и амплитудного разброса). Основные параметры спектрометра представлены в следующей таблице.

Основные параметры СВП ЛНФ

№ п/п	Характеристика	Примечание
1.	Рабочие диапазоны	20; 60; 100.10 ⁻⁹ сек
2.	Интегральная нелинейность	меньше 0,5% диапаз. 60.10 ⁻⁹ сек
3.	Аппаратурное временное разрешение	0,05% диапаз. 60.10 ⁻⁹ сек
4.	Физическое временное разрешение в условиях эксперимента	1,0.10 ⁻⁹ сек для энергий нейтронов 1 Мэв и выше см.рис.2,5,6,9.
5.	Температурная зависимость	0,006% /°С диапаз. 60.10 ⁻⁹ сек
6.	Временное смещение при изменении напряжения питания (+12в) на 1%	0,1%
7.	Долговременная стабильность систем временного анализа	0,1% /8 час
8.	Компенсация амплитудной зависимости	нелинейного типа (дв.логарифмирование) см.рис.2
9.	Разрешение ампл.спектрометрического тракта для α-частиц	40 кэв см.рис.8

Измерения, проведенные при помощи СВП ЛНФ, позволили уточнить его эксплуатационные характеристики в условиях физического эксперимента. Так, например, на электростатическом генераторе Ван-де-Граафа ЛНФ впервые был получен спектр нейтронов по времени пролета из реакции $C^{12}(t, \alpha)N^{14}$. Условия эксперимента

следующие: энергия тритонов - 1,67 Мэв, ток пучка - 3.10⁻⁶а, толщина мишени - 0,1 мг/см², детекторы нейтронов и сопровождающих их вылет γ-квантов - ФЭУ-36 со стильбеновыми кристаллами Ø30 мм и h = 20 мм, пролетная база - 50 см. Системой амплитудного отбора пропускались сигналы, соответствующие энергиям от 0,3 до 5 Мэв для нейтронов и от 0,5 до 5 Мэв для γ-квантов. Независимо от тяжелых условий эксперимента (отсутствие защиты, плохая геометрия, небольшое сечение процесса) были идентифицированы три группы нейтронов с энергиями 3,36; 1,67 и 0,61 Мэв и получено хорошее совпадение с расчетными данными (см.рис.5).

Измерения со спектрометром при использовании полупроводникового детектора были проведены на генераторе Кокрофта-Уолтона - измерялась одновременно энергия нейтронов по времени пролета и энергия α-частиц из реакции $t(d, \alpha)He^4$. Условия эксперимента следующие: энергия дейтронов - 143 кэв, ток пучка - 3.10⁻⁶а, мишень на молибденовой подложке активностью 0,4 кюри. Детектор нейтронов (ФЭУ-36 со стильбеновым кристаллом Ø 30 мм и h = 20мм находился на расстоянии 32 см от мишени. В качестве детектора α-частиц (получение сигнала "старт") применялся кремниевый поверхностно-барьерный счетчик с площадью 0,3 см², толщиной перехода около 200 мк и сопротивлением кремния - 2000 ом.см. Спектр нейтронов показан на рис.6, а спектр α-частиц - на рис.7. Здесь значительный вклад в уширение α-пика вносят конечная толщина мишени и потери энергии α-частиц в фольге от рассеянных дейтронов. Энергетическое разрешение амплитудно-спектрометрического тракта, полученное при помощи α-источника ^{243}Am , ^{241}Am , ^{244}Cm , иллюстрируется рис.8.

Определенный интерес представляет и эксперимент по непосредственному измерению времени пролета γ-квантов, результаты

которого представлены на рис.9. Здесь при помощи двух детекторов (ФЭУ-36 со стильбеновыми сцинтилляторами) измерялись $\gamma\gamma$

совпадения в случае, когда оба детектора находились в непосредственной близости от источника Co^{60} и в случае, когда расстояние детектора "стоп" от источника было увеличено на 30 см. Независимо от изменения загрузки в канале "стоп" (около 2 порядков) и длительного времени измерения результаты хорошо согласуются с расчетом, а полная ширина кривой $\gamma\gamma$ совпадений составляет $450 \cdot 10^{-12}$ сек в первом и $470 \cdot 10^{-12}$ сек во втором случае.

Приложение

Здесь приведены некоторые, наиболее употребительные в практике спектрометрии быстрых нейтронов по времени пролета номограммы.

Заключение

Работы в области методики спектрометрии быстрых нейтронов по времени пролета, нашедшие отражение в реферируемой диссертации, проводились по трем основным направлениям:

1. Создание и использование новых, более эффективных методов исследования и измерения параметров элементов спектрометрических установок: исследование и подбор оптимальных режимов ФЭУ при помощи газоразрядных и полупроводниковых источников световых импульсов с наносекундным временем нарастания; частотный метод измерения линий задержек наносекундного и пикосекундного диапазонов^{74/}; исследование временных интервалов при помощи предложенной переменной измерительной линии с точностью изменения задержки $\approx 10^{-12}$ сек^{73/}; исследование характеристик элементов амплитудно-

спектрометрических трактов СВП с высокой точностью при помощи разработанного измерительного комплекса.

2. Улучшение разрешающей способности спектрометрических установок - впервые выполнен анализ механизма работы систем компенсации амплитудной зависимости и предложены новые, нелинейные методы точной компенсации, позволяющие получать в широком динамическом диапазоне более высокое временное разрешение и улучшить линейность энергетической шкалы СВП. ^{78/}

3. Увеличение объема получаемой в эксперименте информации путем дальнейшего развития структуры СВП - осуществление двумерного анализа (спектрометрирование нейтронов и сопровождающих заряженных частиц), использование впервые полупроводникового детектора в СВП для получения сигнала "старт", создание ряда устройств с высокими эксплуатационными параметрами, входящих в структуру СВП. ^{75,77/}

Вышеперечисленные работы позволили на созданном в ЛНФ ОИЯИ спектрометре быстрых нейтронов по времени пролета получить в условиях физического эксперимента при использовании сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов временное разрешение в $1 \cdot 10^{-9}$ сек в широком динамическом диапазоне энергий нейтронов с одновременным спектрометрированием сопровождающих частиц.

В реферируемую диссертацию включены материалы, опубликованные автором в течение 1963-1967 г.г. ^{71-8/} или доложенные на симпозиумах по ядерной электронике в Будапеште 1963 г. и наносекундной ядерной электронике в Дубне 1967 г. ^{71,7,8/}.

Л и т е р а т у р а

1. М.Дражев, Н.Кашукеев, Т.Драгнев, Н.Панчева и Н.Янева. Доклады первого международного симпозиума по ядерной электронике в Будапеште 1963 г., ОИЯИ, Дубна, 1964.
2. М.Дражев. Препринт ОИЯИ, 2013, 1965.
3. М.Дражев. Препринт ОИЯИ, Р-1997, 1965.
4. М.Дражев. Препринт ОИЯИ, 2345, 1965.
5. М.Дражев, С.Паржицкий. Препринт ОИЯИ, 2787, 1966г.
6. М.Дражев, Н.Кашукеев, Н.Панчева, Н.Чиков. Изв.ФИ с АНБФ, София, 1967.
7. М.Дражев, С.Паржицкий. Препринт ОИЯИ, 3-3466, 1967.
8. М.Дражев, С.Паржицкий. Препринт ОИЯИ, 3-3467, 1967.

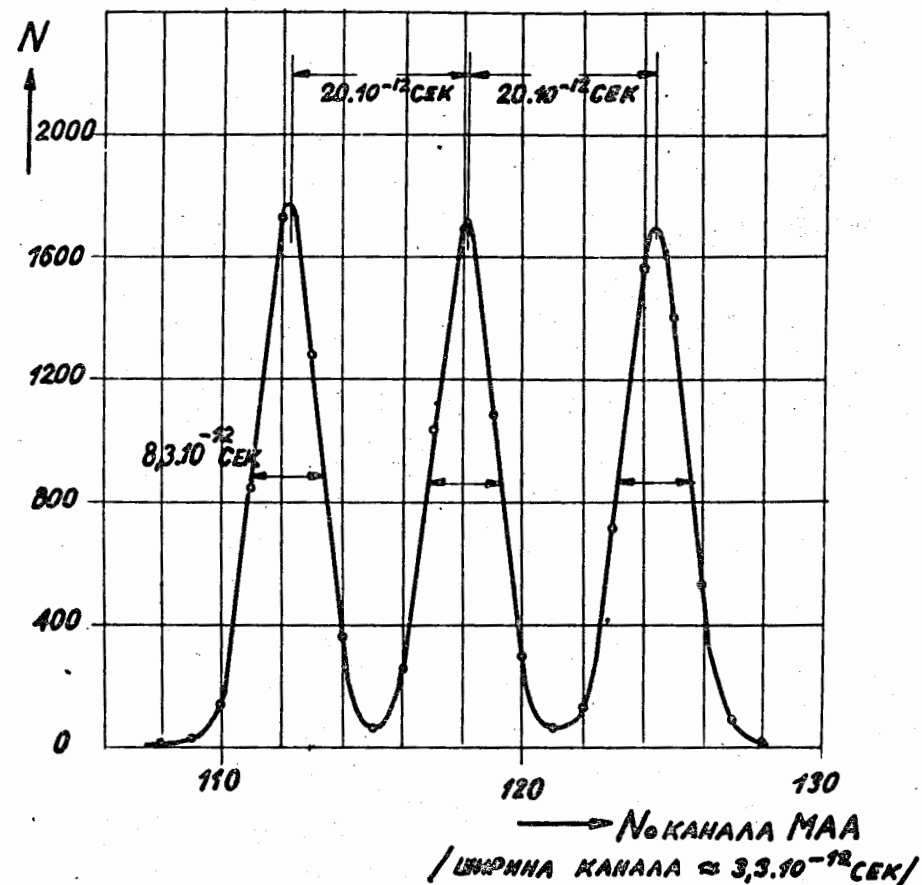


Рис. I Измерение малых временных интервалов при помощи переменной измерительной линии задержки и преобразователя времени в амплитуду. Отдельные пики получены сдвигом через $20 \cdot 10^{-12}$ сек; аппаратное временное разрешение преобразователя - $8 \cdot 10^{-12}$ сек.

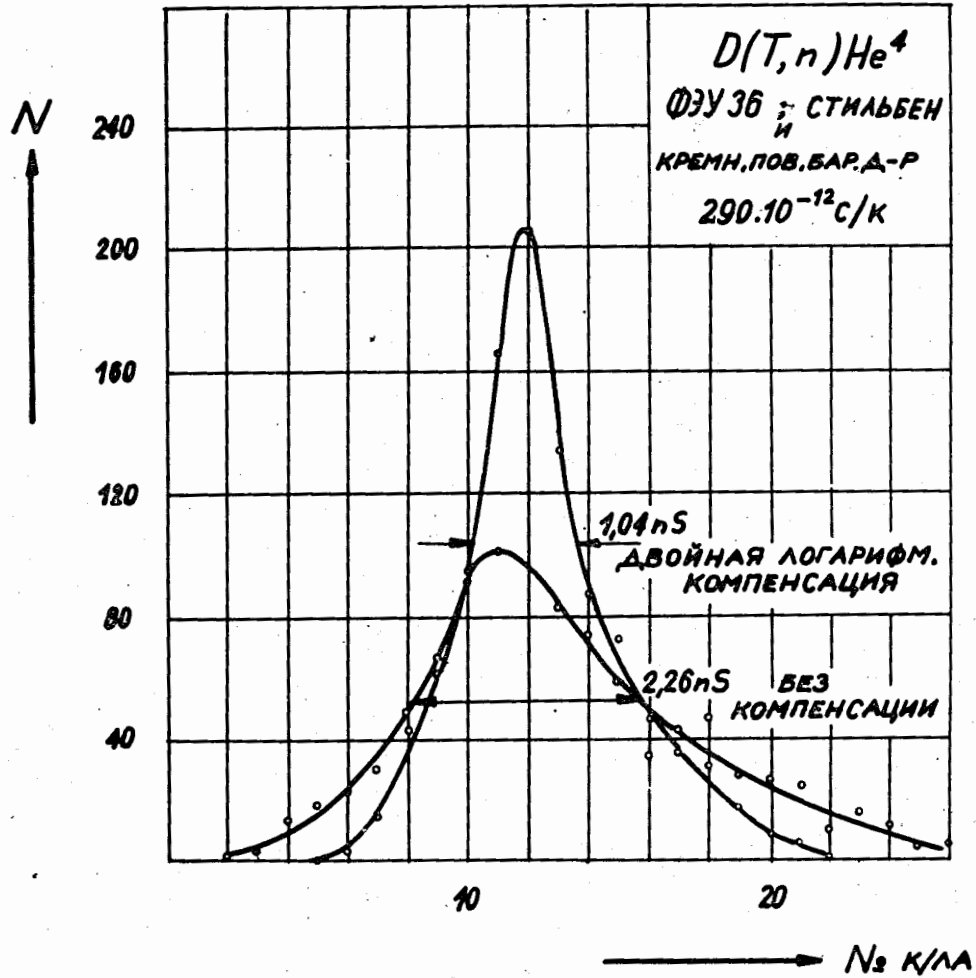


Рис.2 Спектр нейтронов из реакции $T(d,n)He^4$ без компенсации и в случае применения компенсации нелинейного типа (двойное логарифмирование).

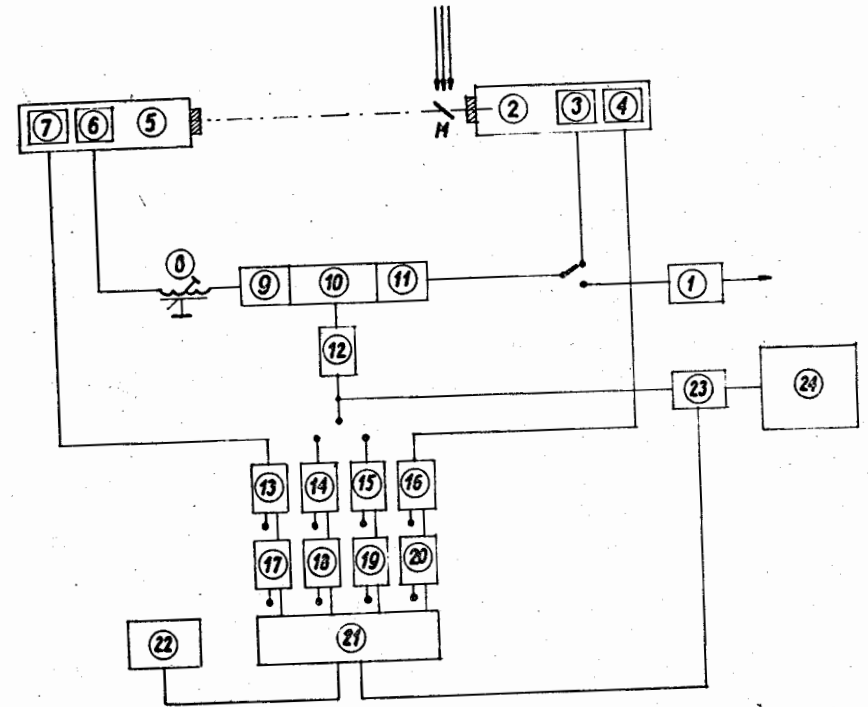


Рис.3 Блок-схема спектрометра быстрых нейтронов по времени пролета.
 М- мишень; I - устройство формирования импульсов для случая импульсного режима работы ускорителя; 2 - сцинтиляционный детектор сопровождающих частиц; 3 - формирователь импульсов для временного анализа; 4 - формирователь импульсов для амплитудно-временного отбора; 5 - сцинтиляционный детектор нейтронов; 6 - формирователь импульсов для временного анализа; 7 - формирователь импульсов для амплитудно-временного отбора; 8 - калибровочный блок задержек; 9 и II - устройства формирования к преобразователю; 12 - линейный усилитель; 13,14,15,16 - линейные усилители; 17,18,19,20 - дифференциальные дискриминаторы; 21 - схема совпадений; 22 - пересчетное устройство; 23 - линейная схема пропускания; 24 - многоканальный амплитудный анализатор.

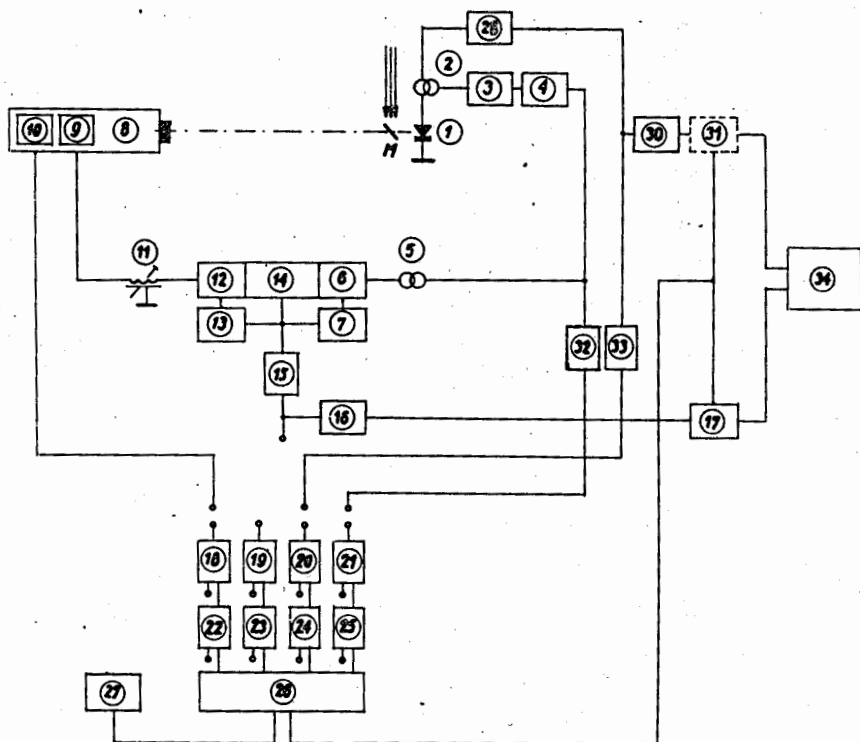


Рис.4 Блок-схема двухмерного спектрометра для одновременного спектрометрирования нейтронов (по времени пролета) и сопровождающих их вылет заряженных частиц при помощи полупроводникового детектора.

М - мишень; I - полупроводниковый детектор;
 2 и 5 - импульсные трансформаторы; 3 и 4 - широкополосный усилитель; 6 и 12 - устройства формирования и
 7 и 13 - устройства компенсации амплитудной зависимости к преобразователю время-амплитуда I4; 8 - детектор нейтронов с формирователями 9 и 10; II - калибровочный блок задержек; 15, 18, 19, 20, 21 - линейные усилители;
 I7 и 31 - линейные схемы пропускания; 22, 23, 24, 25 - дифференциальные дискриминаторы; 26 - схема совпадений;
 27 - пересчетное устройство; 28 - зарядочувствительный предусилитель; 30 - спектрометрический усилитель;
 33 - инвертор; 34 - система двухмерного амплитудного анализа.

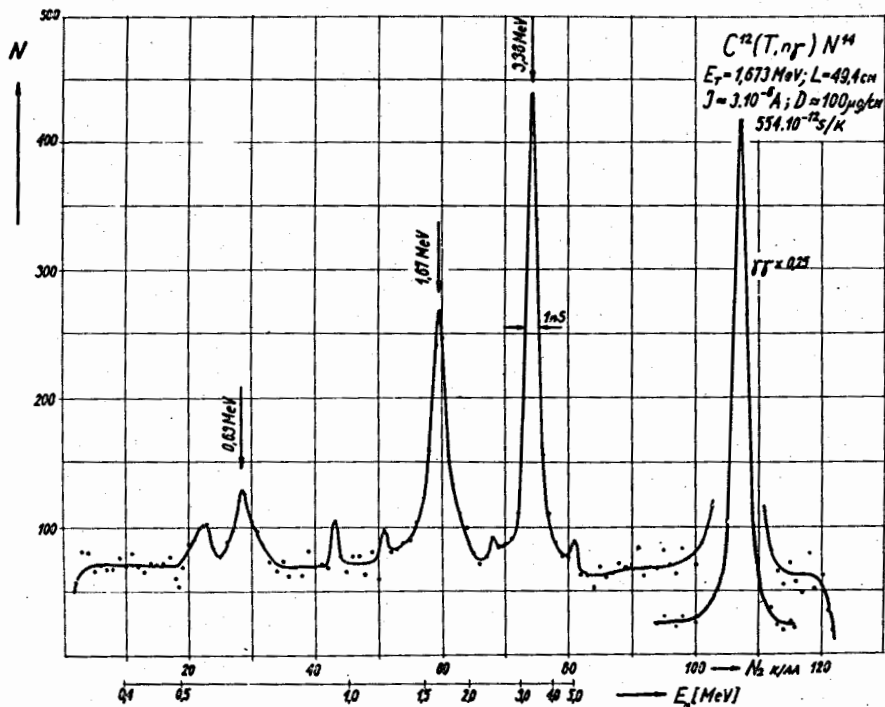


Рис.5 Спектр нейтронов по времени пролета из реакции $C^{12}(T, n) N^{14}$. Детектор нейтронов - ФЭУ-36 со стибленовым кристаллом $\varnothing 30$ мм и $h = 20$ мм; детектор γ квантов - ФЭУ-36 со стибленовым кристаллом $\varnothing 30$ мм и $h = 20$ мм. Пролетная база - 49,8 см; цена канала - $554 \cdot 10^{-12}$ сек; энергия тритонов - 1,673 Мэв; толщина мишени - $100 \cdot 10^{-6}$ г/см². Внизу дана энергетическая шкала нейтронов в Мэв.

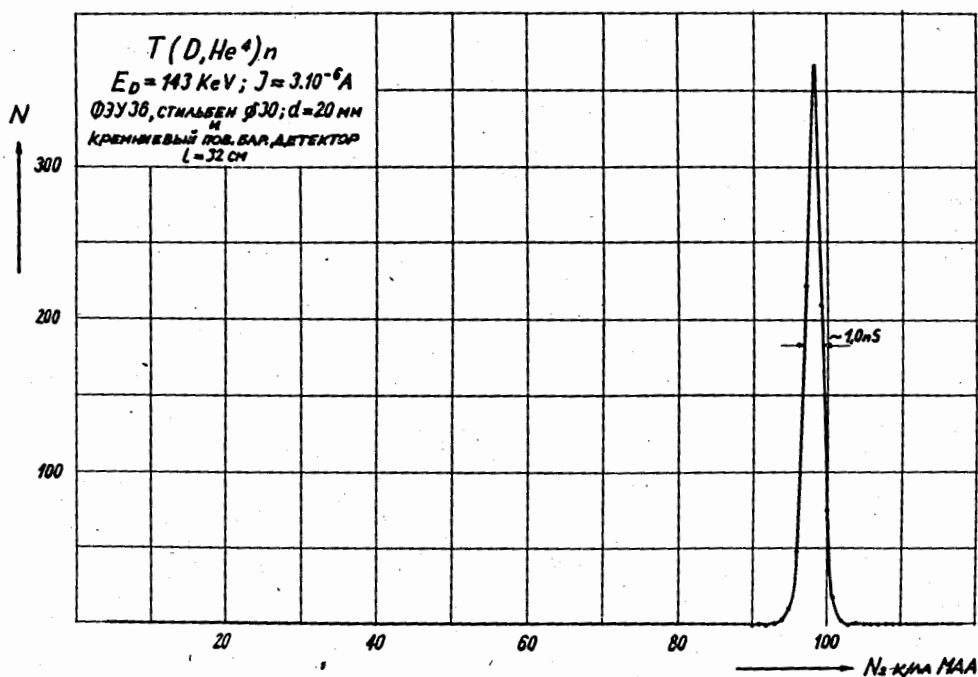


Рис.6 Спектр нейтронов по времени пролета из реакции $T(d, n) He^4$. Сигнал "старт" получается от кремниевого поверхностно-барьерного детектора. Нейтронный детектор - ФЭУ-36 со стильбеновым кристаллом $\phi 30 \text{ мм}$, $h = 20 \text{ мм}$. Пролетная база 32 см. Применена компенсация амплитудной зависимости нелинейного типа (двойное логарифмирование).

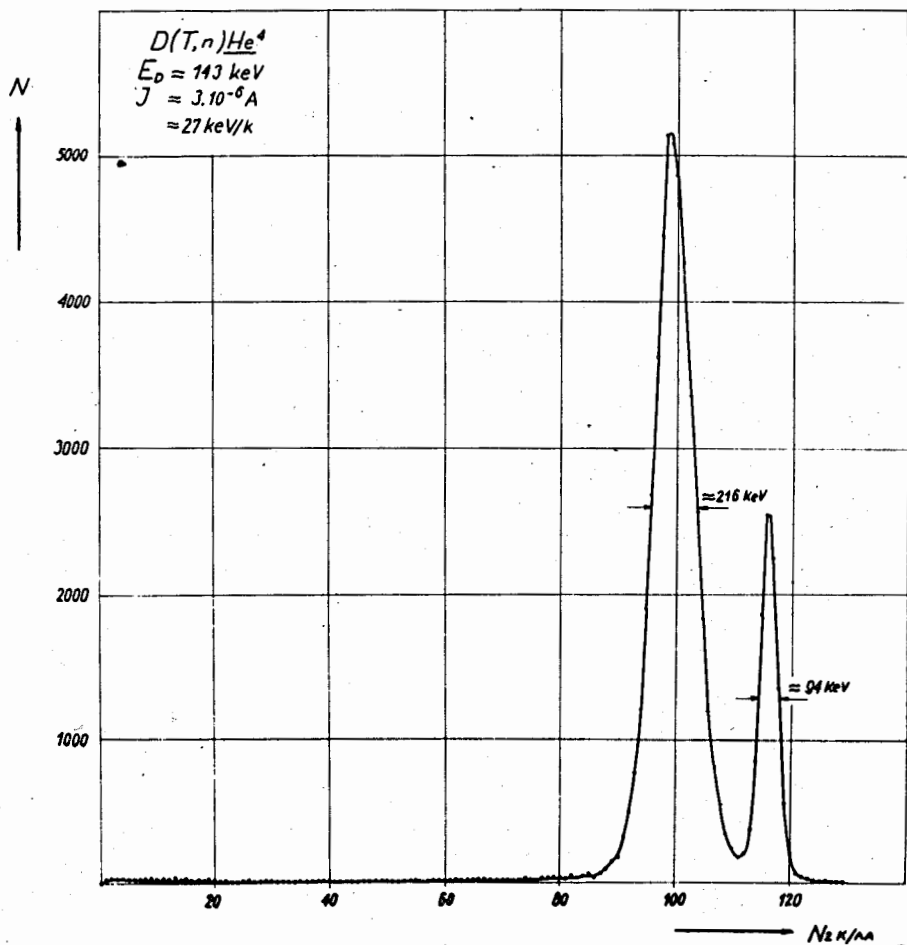


Рис.7 Спектр α -частиц из реакции $T(d, n)^4He$, получаемый одновременно с нейтронным спектром на кремниевом поверхностно-барьерном детекторе. Сопровождающий пик (94 кэв) обусловлен протонами из реакции $D(d, p)T$.

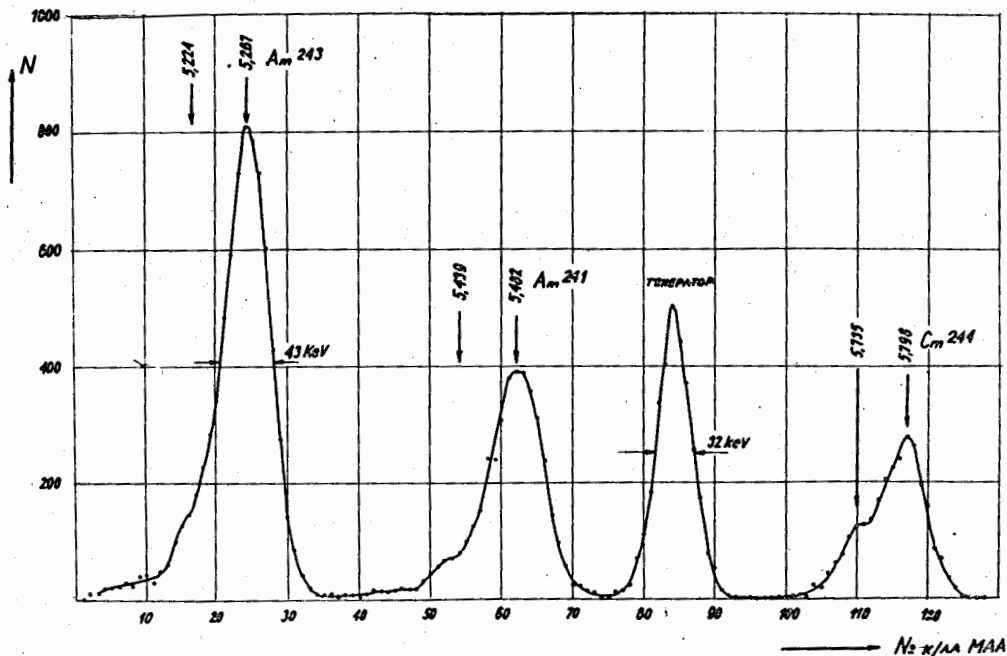


Рис.8 Спектр, иллюстрирующий работу амплитудной части канала сопровождающих частиц, измеренный при помощи кремниевого детектора поверхностно-барьерного типа и источника ^{243}Am , ^{241}Am и ^{244}Cm . Пик генератора получен при включенном детекторе (зарядочувствительный предусилитель выполнен на обычных транзисторах).

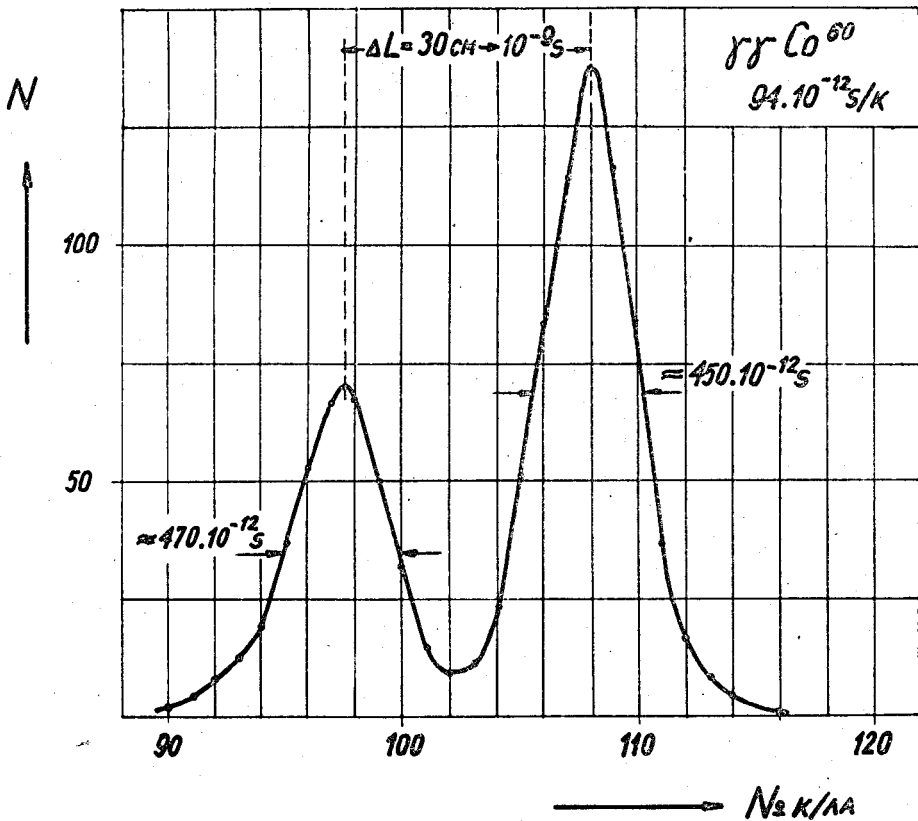


Рис.9 Измерение времени пролета γ квантов (Co^{60}). Детекторы - ФЭУ-36 со стильбеновыми кристаллами ϕ 30 мм и $h = 20$ мм. После получения первого пика (временное разрешение $450 \cdot 10^{-12}$ сек) детектор "стоп" был отодвинут на 30 см и набирался второй пик (временное разрешение $470 \cdot 10^{-12}$ сек; время набора - 3 часа). Цена канала - $94 \cdot 10^{-12}$ сек.