

10. ПРОМЫШЛЕННЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ НЕЙТРОНОВ

Примером промышленного нейтронного спектрометра является дозиметр-спектрометр нейтронов на базе дозиметра ДКС-96Н с набором полиэтиленовых замедлителей и внешним кадмиевым экраном.



Рис. 10. Дозиметр-спектрометр нейтронов ДКС-96Н.

Германиевый полупроводниковый спектрометр фотонного излучения предназначен для оперативного исследования радиационных полей нейтронов различного спектрального состава и различных геометрических конфигураций, в том числе и формируемых пучков нейтронов, для измерения характеристик излучающих нейтроны объектов, для дистанционной дозиметрии нейтронов облучаемых биологических объектов, а также для расширения возможностей полупроводниковых спектрометров фотонного излучения. Он может быть использован в лабораториях, на энергетических установках, транспортных средствах и боевой техники с источниками нейтронов. К областям применения спектрометра относятся фундаментальные и прикладные исследования с нейтронами, ядерная медицина, ядерные гарантии, радиационная безопасность и др.

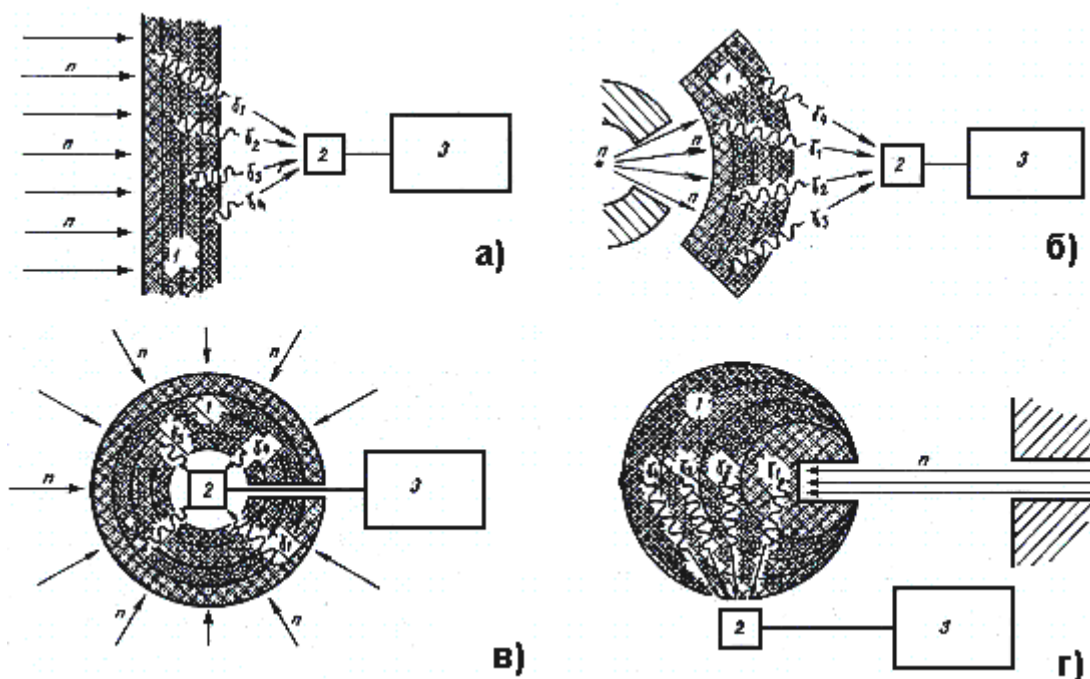


Рис. 11. Источники нейтронов различной топологии.

Основным методом нейтронных измерений является спектрометрия мгновенного фотонного излучения, возникающего в ядерных реакциях (различных типов) нейтронов (различных энергетических групп) с веществами многослойных по составу или однородных мишеней. Эти мишени преобразуют нейтронное излучение в фотонное, которое регистрируется используемым спектрометром фотонов. По количеству зарегистрированных фотонов, соответствующих реакции нейтронов определённой энергетической группы с определённым веществом мишени, рассчитывается плотность потока нейтронов этой энергетической группы или характеристики источника нейтронов.

При дистанционной дозиметрии биологических объектов такой мишенью является сам объект. При этом по количеству зарегистрированных фотонов, соответствующих различным дозообразующим ядерным реакциям, определяется количество этих реакций, и рассчитываются поглощённые дозы нейтронов, соответствующие именно этим реакциям. Основным средством измерений является коммерческий полупроводниковый спектрометр. В тех случаях, когда это необходимо, этот спектрометр может быть портативным с автономным питанием (полевым). Методы регистрации, спектрометрии и дозиметрии нейтронов в течение многих лет используются на реакторе ИР-8 РНЦ «Курчатовский институт» для разработки методов формирования спектров пучков нейтронов (в том числе и при помощи капиллярной оптики), дистанционной дозиметрии при нейтронно-захватной терапии экспериментальных животных, а также для исследований радиационной обстановки в физическом зале реактора, его технологических помещениях и в лабораториях.

Преимущества данного спектрометра нейтронов заключаются в высокой информативности и оперативности. Так, например, время исследования спектрального состава пучка нейтронов занимает не более 30 мин, что в сотни раз меньше чем при использовании традиционных методов активационных детекторов. При этом измеряется и фотонная компонента пучка.

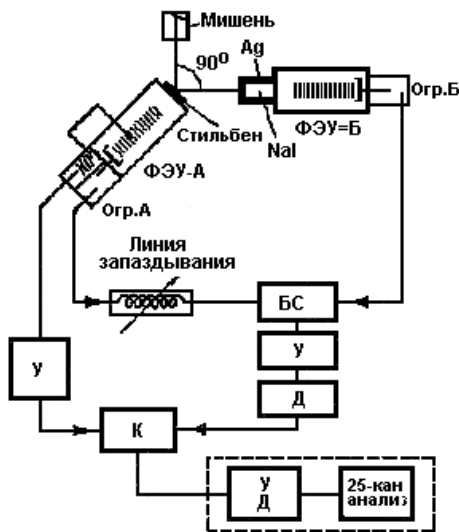
Рис. 12. Спектрометр быстрых нейтронов высокого разрешения.

Спектрометр быстрых нейтронов высокого разрешения на основе жидкого органического сцинтиллятора обеспечивающий, возможность прямого измерения спектра и плотности потока быстрых нейтронов, реализован на нейтронном комплексе ММФ ИЯИ РАН. Принцип действия детектора основан на отдельной регистрации протонов отдачи с последующей компенсацией нелинейности световыхода органического сцинтиллятора. Основные характеристики детектора: способность измерения спектра и плотности потока нейтронов в пределах $100 \div 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в диапазоне энергий $3 \div 50 \text{ МэВ}$; аппаратное разрешение для 14 МэВ не хуже 20%; эффективность в диапазоне $3 \div 15 \text{ МэВ}$ не ниже 0.2%. Спектрометр является уникальным по своим характеристикам и может быть использован для прямого измерения потоков каскадных нейтронов в экспериментальных каналах нейтронного комплекса Московской мезонной фабрики.

Существует секционный спектрометр быстрых нейтронов полного поглощения на основе органического жидкого сцинтиллятора, легированного обогащенным ^6Li . Рабочий диапазон детектора по энергии нейтронов составляет $3 \dots 100 \text{ МэВ}$. Амплитудное разрешение составляет 20%, Высокое аппаратное разрешение достигается компенсацией нелинейного световыхода сцинтиллятора благодаря использованию

отдельных секций, разнесенных в пространстве, которые собирают сцинтилляции от каждого протона отдачи. Такой спектрометр может применяться для низкофоновых экспериментов в физике фундаментальных исследований, с его помощью можно измерять потоки быстрых нейтронов в космосе и оценивать вклад быстрых нейтронов в дозовые поля на ускорителях и атомных станциях.

Рис. 13. Схема установки для исследования спектра быстрых нейтронов: ФЭУ (А и Б)—фотоэлектронные умножители; Огр. (А и Б) — ограничители амплитуд импульсов; У - усилители; Д- дискриминаторы; БС- блок совпадений; К—блок, отпираемый импульсом с блока совпадений



Большинство методов спектроскопии быстрых нейтронов основано на пр-рассеянии и последующем измерении протонов отдачи. Такой способ лежит в основе использования толстослойных фотоэмульсий, органических счётчиков сцинтилляций и ионизационных камер, наполненных водородосодержащими газами, для изучения нейтронных спектров. Однако для перехода от наблюдаемого спектра протонов отдачи к спектру исходных нейтронов во всех упомянутых методах необходимо выполнить подчас довольно сложные расчёты, учитывающие угловую зависимость сечений нейтрон-протонного рассеяния, различную при разных энергиях нейтронов. В результате интерпретация результатов заметно усложняется, а точность получаемых данных падает. Недавно был предложен новый спектрометр быстрых нейтронов, применение которого свободно от указанных выше недостатков. В спектрометре такого типа энергия нейтронов также определяется по энергии протонов отдачи, но при этом регистрируются только протоны, выбитые в направлении исходного нейтронного пучка (под углом 0°), энергия которых практически равна энергии первичных нейтронов. Единственная зависимость, которую в этом случае нужно знать для перехода от протонного к нейтронному спектру — это зависимость дифференциального сечения рассеяния вперёд (под углом 0°) от энергии. Для того чтобы регистрировать только рассеянные вперёд протоны, авторы и применили схему совпадений (Рис.12) между импульсами от фотоэлектронных умножителей А и Б, обусловленными протоном отдачи (стильбеновый кристалл перед ФЭУ-А) и рассеянным под углом, близким к 90° , нейтроном. Для регистрации таких нейтронов перед ФЭУ-Б располагался кристалл NaI, окружённый 5 мм слоем серебра. Захват нейтронов, ядрами серебра или иода сопровождался испусканием γ -квантов, регистрируемых кристаллом и фотоумножителем. Размеры

камер, наполненных водородосодержащими газами, для изучения нейтронных спектров. Однако для перехода от наблюдаемого спектра протонов отдачи к спектру исходных нейтронов во всех упомянутых методах необходимо выполнить подчас довольно сложные расчёты, учитывающие угловую зависимость сечений нейтрон-протонного рассеяния, различную при разных энергиях нейтронов. В результате интерпретация результатов заметно усложняется, а точность получаемых данных падает. Недавно был предложен новый спектрометр быстрых нейтронов, применение которого свободно от указанных выше недостатков. В спектрометре такого типа энергия нейтронов также определяется по энергии протонов отдачи, но при этом регистрируются только протоны, выбитые в направлении исходного нейтронного пучка (под углом 0°), энергия которых практически равна энергии первичных нейтронов. Единственная зависимость, которую в этом случае нужно знать для перехода от протонного к нейтронному спектру — это зависимость дифференциального сечения рассеяния вперёд (под углом 0°) от энергии. Для того чтобы регистрировать только рассеянные вперёд протоны, авторы и применили схему совпадений (Рис.12) между импульсами от фотоэлектронных умножителей А и Б, обусловленными протоном отдачи (стильбеновый кристалл перед ФЭУ-А) и рассеянным под углом, близким к 90° , нейтроном. Для регистрации таких нейтронов перед ФЭУ-Б располагался кристалл NaI, окружённый 5 мм слоем серебра. Захват нейтронов, ядрами серебра или иода сопровождался испусканием γ -квантов, регистрируемых кристаллом и фотоумножителем. Размеры

кристаллов были: стильбен - диаметр 1,6 см, толщина -0,5 см, йодистый натрий - кубик с ребром 2,5 см. Импульсы от фотоумножителей подавались на блок совпадений с разрешающим временем 3-10 сек. При этом импульсы с ФЭУ-А, вызванные протоном отдачи, проходили через линию запаздывания и задерживались на $(3,5 + 1,5) \cdot 10^{-8}$ сек. Указанное время задержки соответствует времени пролёта рассеянных на углы около 90° нейтронов расстояния между кристаллами стильбена и NaJ, равного 6 см. Интервал времени запаздывания задаёт, таким образом, интервал энергии регистрируемых нейтронов (5—30 кэВ). Импульсы с ФЭУ-Б не пропорциональны энергии нейтронов, их максимальная амплитуда задаётся ограничителем Б*. Аналогично импульсы, поступавшие на линию запаздывания - и далее в блок совпадений - с выхода ФЭУ-А - не пропорциональны энергии протонов, ибо лимитируются ограничителем А. Для того чтобы исследовать амплитудное распределение импульсов ФЭУА, пропорциональное спектру выбитых под углом 0° протонов, снимали одновременно импульс не только с выхода, но и с одиннадцатого динода ФЭУ-А. Этот импульс, пропорциональный энергии протонов, подавался через катодный повторитель и усилитель в специальный блок К, отпирившийся только при поступлении в него импульса с блока совпадений. Устройство, позволяло анализировать лишь те импульсы от протонов, которым сопутствовали отпирившие блок К импульсы совпадений. Следовательно, регистрировалось энергетическое распределение только протонов, выбитых под углом 0° , без помех от случайных совпадений. Время отпирания блока К выбиралось в соответствии с временными характеристиками схемы совпадений и линии запаздывания.

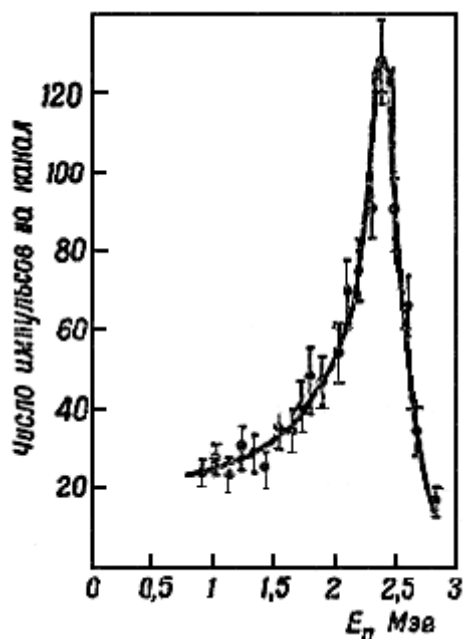


Рис. 14. Спектр нейтронов, образующихся при реакции ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ (мишень -: тонкая).

Анализ импульсов с 11-го динода ФЭУ-А, прошедших сквозь блок К, производился с помощью специального 25-канального анализатора. На **Рис. 14** проводится полученный описанным способом спектр нейтронов от реакции ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ с энергией около 2,8 МэВ. Точность полученных данных является вполне удовлетворительной и превышающей точность других методов. Дополнительное удобство заключается в малой чувствительности прибора к γ -фону благодаря введению запаздывающих совпадений.

Нейтронный времяпролётный спектрометр ГНЕЙС

Гатчинский нейтронный времяпролётный спектрометр - создан на базе синхроциклотрона с энергией протонов 1 ГэВ в Петербургском институте ядерной физики РАН. ГНЕЙС предназначен для

исследований взаимодействия нейтронов с атомными ядрами в широком диапазоне энергий от 10^{-2} эВ до сотен МэВ. Импульсным источником нейтронов служит система "свинцовая мишень, охлаждаемая водой, + полиэтиленовый замедлитель", помещенная в вакуумную камеру ускорителя.

Основные характеристики импульсного источника нейтронов:

- внутренняя охлаждаемая водой прямоугольная свинцовая мишень	40 см*20 см*5 см
- прямоугольный полиэтиленовый замедлитель	30 см*10 см*5 см
- энергия протонного пучка	1 ГэВ
- средний ток протонного пучка	2.3 мкА
- длительность импульса быстрых нейтронов	~ 10 нс
- частота следования	50 Гц (или меньше)
- средняя интенсивность генерации нейтронов	~ $3 \cdot 10^{14}$ н/с

Пять пучков нейтронов выводятся из вакуумной камеры синхроциклотрона и через защитную стену главного зала ускорителя по вакууммированным нейтропроводам транспортируются в лабораторное здание ГНЕЙС. Ось одного пучка № 5 направлена на свинцовую нейтронообразующую мишень, оси других пучков № 1-4 направлены на замедлитель. В пределах экспериментального зала пролетные базы спектрометра имеют длину 35 - 50 метров. Площадь экспериментального зала здания ГНЕЙС составляет $45 \times 30 \text{ м}^2$.

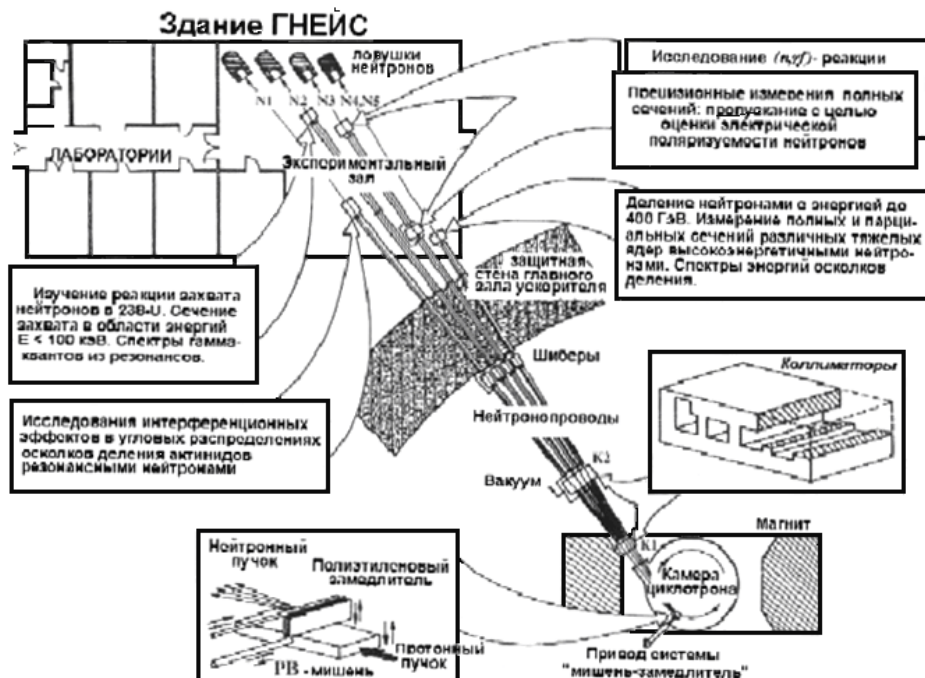


Рис. 15. Общее расположение спектрометра ГНЕЙС:

Сравнение энергетического разрешения и интенсивности нейтронов ГНЕЙСа с аналогичными параметрами других хорошо известных времяпролетных спектрометров (например, ИБР-30, LANSCE) показывает, что ГНЕЙС успешно конкурирует в своем энергетическом диапазоне.

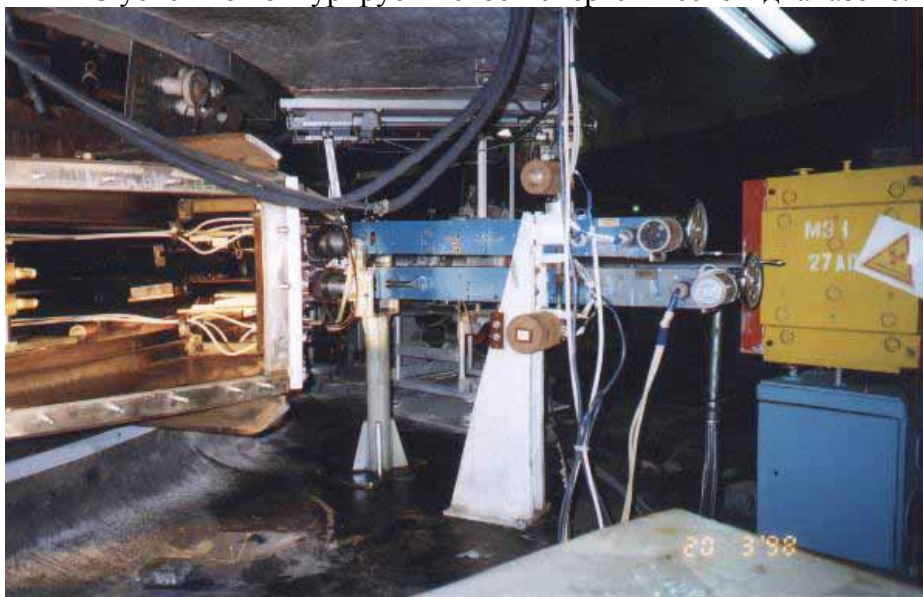


Рис. 16. Расположение системы «нейтронообразующая мишень + полиэтиленовый замедлитель» спектрометра ГНЕЙС в вакуумной камере ускорителя. Боковая крышка вакуумной камеры снята.

*_*_*

Анализ обширного современного списка потребностей в нейтронных данных указывает на настоятельную необходимость дальнейшего развития нейтронной спектроскопии, включая создание новых методов для решения ряда специфических проблем науки и техники и, в частности, для развития нейтронной спектromетрии ядер, удалённых от полосы β -стабильности.



Рис. 17. Две ионизационные камеры деления, стоящие на пучке быстрых нейтронов № 5. Первая камера содержит слои с актинидными веществами, используется в работе "Neutron induced fission cross-sections of ^{233}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{237}Np and ^{239}Pu relative to ^{235}U from 1 MeV to 200 MeV". Вторая - содержит слои natPb и Bi, используется в работе "Neutron induced fission cross-sections of lead and bismuth relative to ^{235}U in the energy range 30 - 200 MeV".