

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



24/11-78

Г-874

P13 - 11363

1820/2-78

И.И.Громова, Я.Дупак, Я.Коничек, Т.И.Крацккова,
Н.А.Лебедев, А.Махова, Б.С.Неганов, Й.Ота,
В.Н.Павлов, И.Прохазка, И.Ржиковска, М.Фингер,
В.И.Фоминых, М.И.Фоминых, Хан Хей Мо,
В.М.Цупко-Ситников, А.Ф.Щусь, З.Яноут

ФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПАДА

ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЯДЕР.

УСТАНОВКА "СПИН"

1978

P13 - 11363

И.И.Громова, Я.Дупак, Я.Конишек, Т.И.Крацикова,
Н.А.Лебедев, А.Махова, Б.С.Неганов, Й.Ота,
В.Н.Павлов, И.Прохазка, И.Ржиковска, М.Фингер,
В.И.Фоминых, М.И.Фоминых, Хан Хен Мо,
В.М.Цупко-Ситников, А.Ф.Щусь, З.Яноут

**ФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПАДА
ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЯДЕР.**

УСТАНОВКА "СПИН"

*Направлено в журнал "Прикладная ядерная
спектроскопия" и на 28 совещание по ядерной
спектроскопии и структуре атомного ядра
/Алма-Ата, 1978/.*

Громова И.И. и др.

P13 - 11363

Физический комплекс для исследований распада ориентированных ядер в ОИЯИ. Установка "СПИН"

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ создан комплекс аппаратуры и методики для изучения распада ядер, ориентированных за счет сверхтонкого электромагнитного взаимодействия при сверхнизких температурах (0,01 К). Описана методика, позволяющая на базе синхроциклотрона ЛЯП, радиохимии, масс-сепарации и термической обработки получать для ядерной ориентации источники в широком диапазоне Z и A и периодов полураспада. Приводятся характеристики рефрижератора растворения ^3He - ^4He , обеспечивающего охлаждение образцов до температуры 12 мК в течение 3 ч. и возможность их замены на любой стадии работы. Ориентация ядер осуществляется внутренним магнитным полем ферромагнитной матрицы, приводимой в состояние магнитного насыщения внешним полем сверхпроводящего магнита (1,2 Т). Создан измерительный модуль установки, включающий полупроводниковые детекторы, электронику и многоканальные анализаторы на линии с ЭВМ. Разработана система программ для обработки данных и анализа результатов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Gromova I.I. et al.

P13 - 11363

Facility for the Study of the Decay of Oriented Nuclei - SPIN

The experimental facility for the study of the decay of oriented nuclei in a broad range of Z, A and half-lives based on hyperfine interaction at ultralow temperatures has been created at LNP, JINR. Samples of radioactive isotopes in ferromagnetic hosts for nuclear orientation are prepared by using radiochemistry, electromagnetic mass-separation, implantation technique, and temperature treatment. ^3He - ^4He dilution refrigerator is capable of fast cooling of a sample inserted into the mixing chamber to the base temperature 12 mK for about 3h. The change of samples can be done at any operating stage of the refrigerator. Nuclear orientation is performed by internal magnetic field of a ferromagnetic host which is saturated under an external field of a superconducting magnet (1,2 T). The measuring module of the facility has been constructed which consists of semiconductor detectors, electronics and multi-channel analyzers on-line with the computer. The software has been developed for processing the data and analysis of the results.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение углового распределения ориентированных ядер дает большие возможности для исследования структуры атомного ядра^{/1-3/}, а также для изучения некоторых свойств фундаментальных взаимодействий, например, сохранения пространственной четности^{/4/} или временной инвариантности^{/5/} при ядерных превращениях. Такое изучение может служить инструментом для исследований в области атомной физики и физики твердого тела^{/6/}.

Общеизвестно, что вероятность испускания излучения распадающегося радиоактивного ядра является анизотропной по отношению к направлению его спина. Однако при нормальных условиях угловое распределение излучения ансамбля радиоактивных ядер изотропно, так как характерные угловые распределения отдельных видов ядерных излучений усредняются по большому числу случайно ориентированных в пространстве ядер ансамбля. Сверхтонкое взаимодействие при сверхнизких температурах может привести к неодинаковым заселенностям ядерных подуровней и тем самым - к анизотропии углового распределения излучения ядер ансамбля. При воздействии магнитного поля \vec{H} на ансамбль ядер, обладающих спином J и магнитным моментом $\vec{\mu}$, заселенности отдельных магнитных подуровней m при температуре T будут пропорциональны фактору Больцмана $P \sim \exp\{-\mu H m / kT\}$ где k - постоянная Больцмана. Для получения заметной разницы в заселенностях подуровней необходимо, чтобы тепловая энергия kT была порядка энергии сверхтонкого расщепления μH . Это для $\mu \approx 1$, $J=1$ приводит к зна-

чению отношения $N/T \approx 3 \cdot 10^3$ [Т/К], что при температуре $T = 10$ мК дает магнитное поле $H \approx 30$ Т. Использование больших эффективных полей /до 10^3 Т/, действующих на примесные ядра в ферромагнитных матрицах /Fe, Ni, Co, Gd /77/, и применение рефрижераторов растворения ^3He в ^4He /8,9/ для получения в непрерывном режиме сверхнизких температур порядка 10 мК позволяет сравнительно легко выполнить указанные требования.

Угловое распределение неполяризованного гамма-излучения при температуре T дается выражением /2/:

$$1/W(\theta, T) = \sum_k B_k(T) A_k U_k P_k(\cos \theta).$$

Здесь θ - угол между направлением испускания гамма-кванта и направлением магнитного поля; $B_k(T)$ - статистические тензоры, определяющие степень начальной ориентации распадающихся ядер. Параметры $B_k(T)$ зависят от заселенностей $p_m(T)$ и, таким образом, являются функцией температуры T и величин, характеризующих взаимодействие ядра с окружающей его средой; A_k - коэффициенты угловой корреляции, зависящие от мультипольности наблюдаемого излучения и спинов состояний, между которыми происходит данный переход; U_k - коэффициенты, описывающие изменение ориентации, обусловленное переходами, предшествующими наблюдаемому гамма-переходу; $P_k(\cos \theta)$ - полиномы Лежандра; суммирование по k ведется в пределах $0 \leq k \leq \min |2L, 2I_i, 2I_f|$, где L - мультипольность наблюдаемого гамма-излучения $I_i \rightarrow I_f$ между состояниями со спином I_i и I_f , I_0 - спин распадающихся ориентированных ядер.

В зависимости от имеющихся исходных данных изучение углового распределения излучения ориентированных ядер и его температурной зависимости дает информацию о магнитных моментах основных состояний, спинах основных и возбужденных состояний атомных ядер, о коэффициентах смеси мультипольностей ядерного излучения, о параметрах сверхтонкого взаимодействия ядра с окружающей средой и т.п.

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ была поставлена и решена задача создания установки для исследо-

вания распада ориентированных радиоактивных ядер в широком диапазоне Z и A с периодами полураспада больше одного часа /установка "СПИН"/.

Создана методика, которая позволяет с помощью масс-сепаратора и термической обработки в течение 1-2 ч готовить радиоактивные образцы для исследований на установке "СПИН". Криогенная часть установки обеспечивает охлаждение образцов до температуры 12 мК в течение 3 ч и позволяет заменять их на любой стадии работы. Для регистрации гамма-излучения ориентированных радиоактивных ядер создан измерительный модуль, включающий полупроводниковые детекторы, спектрометрическую электронику и многоканальные анализаторы, работающие на линии с ЭВМ. Для обработки эксперимен-

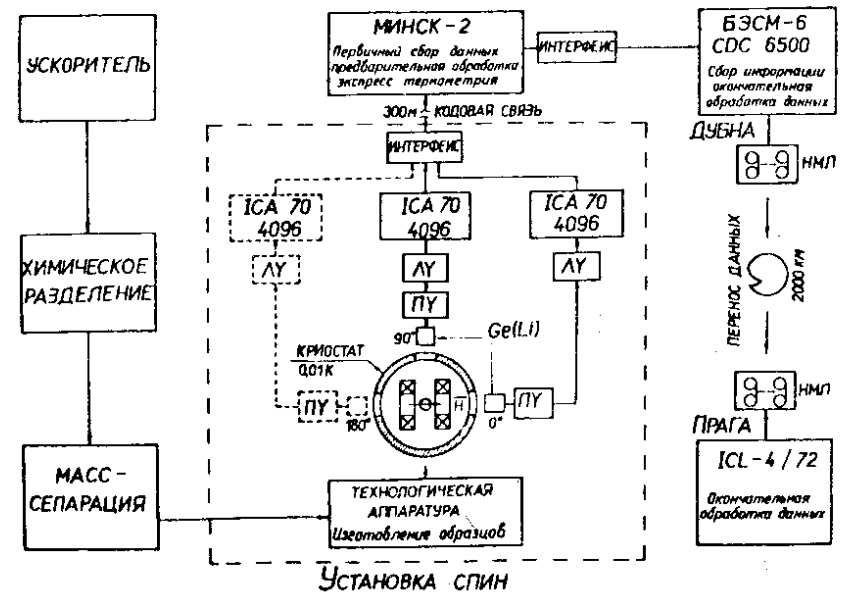


Рис. 1. Блок-схема установки "СПИН" и ее внешние связи. ПУ - зарядочувствительные предусилители; ЛУ - спектрометрические усилители; ICA-70 - многоканальные анализаторы; НМЛ - накопители на магнитной ленте.

тальных данных и физического анализа результатов создана система программ для ЭВМ БЭСМ-6, CDC-6500 и ICL-4/72.

Использование Ge(Li) -детекторов высокого разрешения и необходимость измерения лишь одномерных спектров позволяют проводить исследования на установке "СПИН" с источниками относительно малой активности /0,1-10 мкюри/, что открывает возможности для исследований ядер, получаемых в малых количествах.

Блок-схема установки "СПИН" и ее внешние связи показаны на рис. 1.

2. ПРИГОТОВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ

2.1. Получение радиоактивных изотопов

Основным источником изотопов для исследования на установке "СПИН" является синхротрон Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с максимальной энергией протонов 680 МэВ при токе внутреннего пучка 2,3 мкА. На базе этого ускорителя осуществляется программа ЯСНАПП - ядерная спектроскопия на пучке протонов, имеющая два взаимодополняющих направления:

а/ исследования относительно долгоживущих изотопов / $T_{1/2} > 1$ ч /, для получения которых используется внутренний пучок ускорителя, развитая радиохимическая технология выделения активных продуктов из вещества мишеней и масс-сепаратор в "off-line" режиме ^{/10/},

б/ изучение короткоживущих изотопов / $T_{1/2} < 1$ ч / с использованием внешнего пучка и масс-сепаратора в полу- "on-line" режиме ^{/10/}.

В настоящее время установка "СПИН" ориентирована на работу в первом направлении исследований по программе ЯСНАПП.

Помимо источников, получаемых при облучении на синхротроне ЛЯП, в ряде случаев используются циклотронные и реакторные радиоактивные препараты.

2.2. Радиохимическая обработка

Нейтрондефицитные изотопы тяжелых лантаноидов с дефицитом в 5-10 нейтронов образуются в реакциях глубокого расщепления при облучении танталовой мишени на внутреннем пучке протонов синхроциклотрона. Для получения моноизотопных источников активные продукты выделяются из вещества мишени и разделяются на химически чистые фракции, из которых затем приготавливаются препараты для изотопного разделения на электромагнитном масс-сепараторе. Облученная танталовая мишень растворяется в смеси фтористоводородной и азотной кислоты, микроколичества лантаноидов - продуктов ядерных реакций - сорбируются из этого раствора на фториде лантана и разделяются на фракции элементов в ионообменной хроматографической колонке ^{/11/}.

Изотопы легких лантаноидов из-за малого сечения образования в танталовой мишени получают в реакциях типа (p, xn) при облучении гадолиниевой мишени с последующим химическим выделением их фракций из вещества мишени методом экстракционной хроматографии.

Для изотопов тербия потери при химическом разделении составляют 15-20% активности, весь процесс химической обработки мишени до получения препаратов, пригодных к масс-сепарации, занимает полтора-два часа.

2.3. Электромагнитное разделение и термическая обработка

После химической сепарации производится разделение изотопов фракции с помощью масс-сепаратора ^{/12/}. В масс-сепараторе для лантаноидов используется ионный источник с поверхностной ионизацией ^{/13/}. Эффективность выхода редкоземельных изотопов при разделении с таким источником достигает 10-30%. Одновременно с разделением по массам осуществляется имплантация моноизотопов в ферромагнитную матрицу. Ускоряющий потенциал можно изменять в пределах от 25 до 65 кВ. Недостатком этого процесса является нарушение кристал-

лической структуры матрицы при ее бомбардировке ионами, и неопределенность положения внедренных ионов.

Полученные нами данные показывают, что использование образцов, приготовленных прямой имплантацией, приводит, как правило, к затруднениям при интерпретации экспериментальных результатов. Поэтому после имплантации применяется термическая обработка образцов.

Наш опыт в изготовлении образцов для ядерной ориентации относится, главным образом, к изотопам тербия в матрице из гадолиния, в которой почти все редкоземельные элементы хорошо растворяются^{14/} и внутренние магнитные поля достигают больших значений^{17/}.

Вследствие сильной химической активности гадолиния его термообработку нужно вести в вакууме порядка 10^{-6} мм рт.ст. Термическая обработка образцов производится в радиационной вакуумной печи. Нагреватель печи изготовлен в форме цилиндра диаметром 20 мм и длиной 30 мм из танталовой фольги толщиной 0,1 мм. В печи можно получить на образце температуру более 2000°C. Вакуум порядка 10^{-6} мм рт.ст. достигается в течение трех минут.

Образцы с радиоактивными изотопами тербия /рис. 2/ приготавливаются следующим образом. На танталовую фольгу толщиной 0,1 мм наплавляется в вакууме около 0,05 г гадолиния. Затем изотоп тербия имплантируется в гадолиний на масс-сепараторе. Танталовая фольга со слоем гадолиния с имплантированными радиоактивными ядрами тербия нагревается в вакууме в течение нескольких десятков секунд до температуры плавления гадолиния. При этой температуре делается выдержка в несколько секунд с целью получения хорошего растворения тербия в жидком гадолинии.

В результате последующего охлаждения матрица должна приобрести правильную структуру. Для этого охлаждение в области фазового перехода гадолиния о.ц.к. → г.п.у. /~1260°C/ ведется сначала медленно /в течение 10 мин до температуры 950°C/, а затем при выключенном нагреве /до температуры 100°C также в течение 10 мин/.

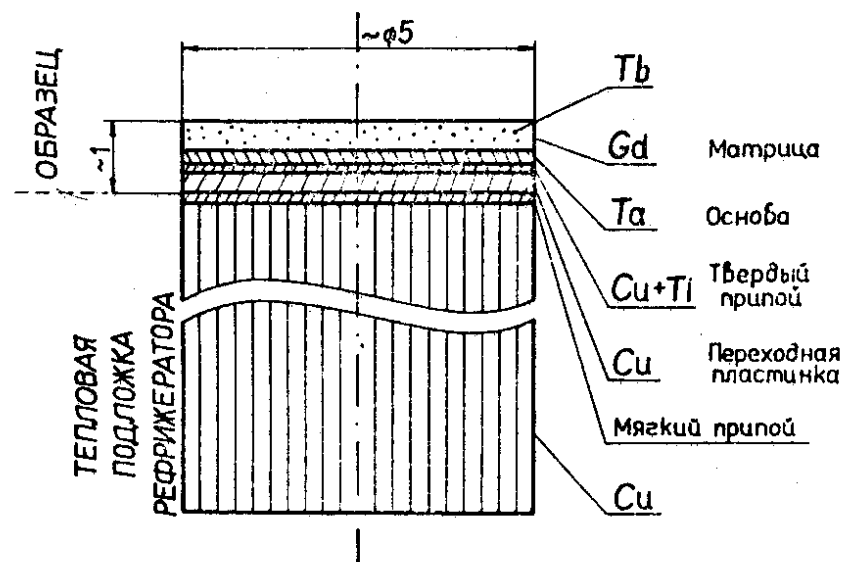


Рис. 2. Радиоактивный образец на тепловой подложке рефрижератора.

Для эффективного охлаждения образца в рефрижераторе используется медная тепловая подложка с развитой поверхностью теплообмена^{15/}. Хороший тепловой контакт образца с тепловой подложкой обеспечивается тем, что образец припаивается к ней мягким припоем. В связи с тем, что отсутствует мягкий припой для присоединения тантала к медной тепловой подложке, необходима еще одна операция. Она состоит в том, что танталовая основа матрицы припаивается твердым припоем в вакууме на переходную пластинку из материала, который уже можно паять мягким припоем. Переходная пластинка /как правило, из меди/ припаивается к танталу с помощью активного титанового припоя в вакууме. В тех случаях, когда может возникнуть необходимость дополнительной термообработки образца при температуре выше 800°C, танталовая основа припаивается к никелевой пластине с помощью припоя AgPd30 в вакууме.

После пайки образцу придается форма диска диаметром около 5 мм /рис. 2/. Для удаления активности

с поверхности образца производится ее механическая и химическая очистка.

В результате термической и механической обработки образца в гадолиниевой матрице могут возникнуть внутренние напряжения. Поэтому в некоторых случаях образцы подвергаются продолжительному отжигу в вакууме при температуре 400°C .

В настоящее время технологическое оборудование установки позволяет изготовить образец $\text{Tb}(\text{Gd})$ в течение 1,5 ч после окончания электромагнитного разделения.

3. КРИОГЕННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ И ОРИЕНТАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ЯДЕР

3.1. Комбинированный рефрижератор растворения ^3He в ^4He

Короткое время жизни изучаемых радиоактивных изотопов предъявляет жесткие требования к методу и устройству для их охлаждения. Поэтому во всей технологической цепочке подготовки эксперимента установка для охлаждения радиоактивных изотопов является наиболее узким звеном, определяющим область ядер, доступных для изучения. При изучении изотопов с периодом полураспада около одного часа в настоящее время можно использовать рефрижераторы, работающие по принципу растворения ^3He в ^4He . Технический прием форсирования охлаждения заключается в том, чтобы образец, содержащий короткоживущий радиоактивный изотоп, быстро вводить в рефрижератор, выведенный заранее на нужный температурный режим работы. При этом нужно решить задачу предварительного охлаждения образца от комнатной температуры до $T < 1\text{ K}$. В связи с этим возможны две конструкции рефрижераторов растворения. Можно использовать рефрижератор с камерой растворения "закрытого" типа, имеющий вакуумный канал с теплым шлюзом, через которые экспериментальный образец вводят в действующий рефрижератор и за-

крепляют механическим способом на камере растворения^{/16/}.

На установке "СПИН" для охлаждения радиоактивных источников применен комбинированный рефрижератор растворения^{/15/} с камерой растворения "открытого" типа. Особенность этого рефрижератора состоит в том, что в нем камера растворения и камера испарения соединены между собой, минуя систему теплообменников, дополнительным каналом, перекрывающимся съемной тепловой пробкой^{/17/}. Нижняя часть тепловой пробки входит непосредственно в камеру растворения, и на ней можно размещать экспериментальные образцы или целые устройства. Предложенная конструкция имеет преимущества, так как позволяет манипулировать экспериментальным образцом при сверхнизкой температуре, размещать его непосредственно в камере растворения и заменять другим на любой стадии работы рефрижератора. Кроме того, отпадает задача предварительного охлаждения, т.к. понижение теплосодержания образца и тепловой пробки осуществляется за счет теплообмена с холодным паром ^3He , откачиваемым из камеры испарения.

3.2. Внешняя система рефрижератора

Комплекс криогенного оборудования установки "СПИН" состоит из комбинированного рефрижератора растворения /рис. 3/, размещенного в автономном гелиевом криостате, группы насосов с вакуумными и газовыми линиями откачки, системы сбора газообразного гелия и его закачки в баллоны высокого давления, а также транспортных сосудов Дьюара для жидкого азота и гелия. Основу внешней системы циркуляции смеси $^3\text{He}-^4\text{He}$ /рис. 4/ составляет бустерный паромасляный насос БН-2000 производительностью 2000 л/с. Для предварительной откачки используется механический вакуумный насос ВН-1 производительностью 18 л/с. Для уменьшения уровня вибраций экспериментальной установки механический вакуумный насос удален от установки на расстояние 30 м и закреплен на массивном

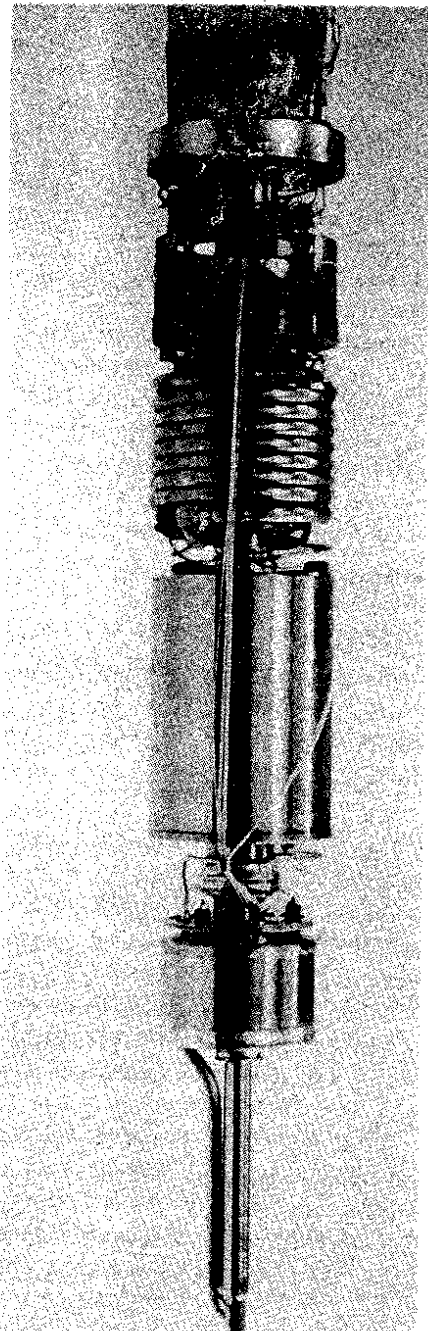


Рис. 3. Комбинированный рефрижератор растворения без вакуумной рубашки.

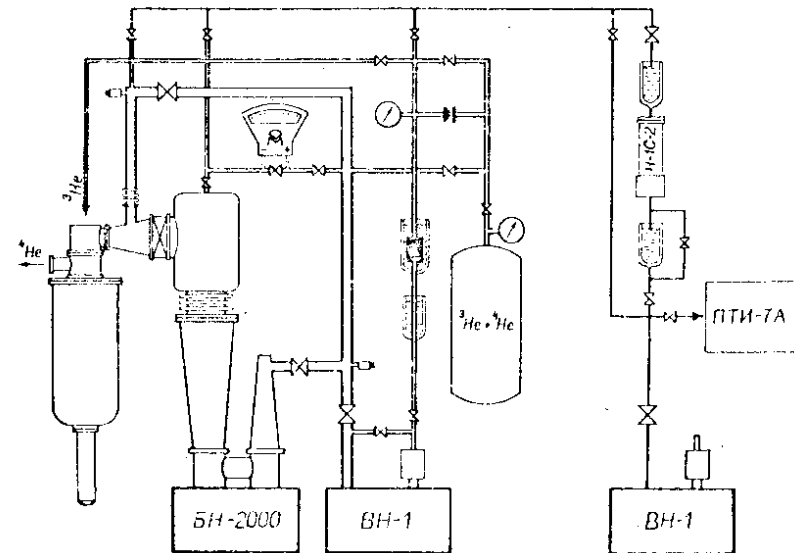


Рис. 4. Схема линий циркуляции смеси ^3He в ^4He . ВН-2000 - бустерный паромасляный насос; ВН-1 - механический вакуумный насос; Н-1С-2 - вспомогательный диффузионный вакуумный насос; ПТИ-7А - масс-спектрометрический гелиевый течеискатель.

фундаменте, имеющем пневматическую подвеску. Система циркуляции содержит механические, вымораживающие и криoadсорбционные фильтры, в которых смесь $^3\text{He} - ^4\text{He}$ очищается от паров масла и конденсируемых газов. Кроме того, в систему встроено устройство для очистки смеси от водорода, неизбежно накапливающегося в связи с крекингом вакуумного масла в механическом насосе. Установлено, что скорость накопления водорода в нашей системе составляет около $0,1 \text{ см}^3 \text{ НРТ}$ в час.

3.3. Эксплуатационные характеристики

Рабочий запуск криогенного комплекса начинается с предварительного охлаждения криостата и рефрижератора жидким азотом, продолжающегося 3 ч. Гелиевое ох-

лаждение и заливка занимают около 1,5 ч. Первый цикл охлаждения рефрижератора до рабочей температуры продолжается обычно 6 ч. Контроль уровня заполнения рабочих емкостей жидким гелием осуществляется с помощью контактных сверхпроводящих датчиков^{/18/}, способных работать в любых тепловых режимах гелиевого криостата.

Ориентация ядер, внедренных в магнитную матрицу, осуществляется с помощью внешнего магнитного поля, насыщающего доменную структуру матрицы вдоль оси магнита. Магнитная система состоит из пары сверхпроводящих катушек Гельмгольца, запитывается от источника стабилизированного тока и может переводиться с помощью сверхпроводящего ключа в режим работы с замороженным потоком. Напряженность магнитного поля системы может достигать до 1,2 Т.

Смена экспериментального образца осуществляется обычно при температуре <100 мК. Процедура смены образца занимает около 15 мин, а стартовая температура рефрижератора при последующем охлаждении лежит в диапазоне 150-300 мК. Типичный график работы рефрижератора показан на рис. 5. Минимальная температура на образце в непрерывном режиме охлаждения составляет 12 мК. Промежуточные температурные режимы вплоть до 800 мК получаются с помощью электрического подогрева камеры растворения. Достижение температур ниже 10 мК возможно в разовом режиме работы рефрижератора. Для этой цели камера растворения и камера испарения имеют большой запас концентрированной и разбавленной фаз гелия-3. Разовый режим работы рефрижератора можно продолжать 4-5 ч в зависимости от скорости откачки ³He.

Контроль и измерение температуры в различных частях рефрижератора осуществляются термометрами сопротивления, в качестве которых используются резисторы Speer Grade 1002 с номиналом 10 и 100 Ом. Измерения производятся мостом переменного тока типа Cryo bridge S72 при измерительной мощности 10^{-14} - 10^{-12} Вт. Для измерения температуры изучаемого источника излучения используется один из ядерных ориен-

тационных термометров ⁵⁴Mn(Ni), ⁵⁷Co(Fe) и др.^{/19/}, припаянный мягким припоем совместно с изучаемым образцом на тепловую подложку. Точность измерения температуры по ядерному ориентационному термометру 2-5%.

4. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Блок-схема используемой в настоящее время электроники составляет часть рис. 1. Регистрация гамма-излучения ориентированных ядер осуществляется с помощью Ge(Li) детекторов в криостатах Г-образной формы, установленных под углами 0°, 90° и 180° по отношению к направлению внешнего магнитного поля. Система регистрации позволяет вести одновременные измерения под тремя углами. Минимальное расстояние от детектора до источника составляет 70 мм. На пути гамма-лучей от источника до каждого из детекторов находится пять стенок из нержавеющей стали общей толщиной 0,6 мм. Усиление и формирование спектрометрических сигналов осуществляется с помощью стандартной электроники, разработанной в ОИЯИ^{/20,21/}. Гамма-спектры регистрируются многоканальными анализаторами типа ISA-70, имеющими память на 4096 каналов и соответствующие АЦП с частотой серии 100 МГц, и затем через линию прямой односторонней связи^{/22/} записываются на магнитные ленты ЭВМ "Минск-2".

Для быстрой обработки гамма-линий в спектрах ядерного ориентационного термометра применяются дисплейные программы предварительной обработки^{/23/}, имеющиеся на ЭВМ "Минск-2". Результаты используются для контроля температуры образца в ходе эксперимента.

Для последующей обработки спектры передаются с ЭВМ "Минск-2" по кабельной линии связи на ЭВМ БЭСМ-6^{/24/}, где они записываются на магнитные ленты.

Основной задачей обработки гамма-спектров, измеряемых на установке "СПИН", является определение площадей спектральных линий, необходимых для получения угловой и температурной зависимости функции

$W(\theta, T)$, уравнение /1/. Для определения площадей имеется несколько возможностей. На БЭСМ-6 γ -спектры обрабатываются по системе программ "SIMP"/25/. Имеется возможность переноса спектров, записанных на магнитных лентах, для обработки на ЭВМ ICL-4/72 в ЧССР по системе программ "SIMP" или по программе "SPECTR"/26/. Кроме того, спектры можно обрабатывать на ЭВМ "Минск-2" с помощью программы "КАТОК"/27/.

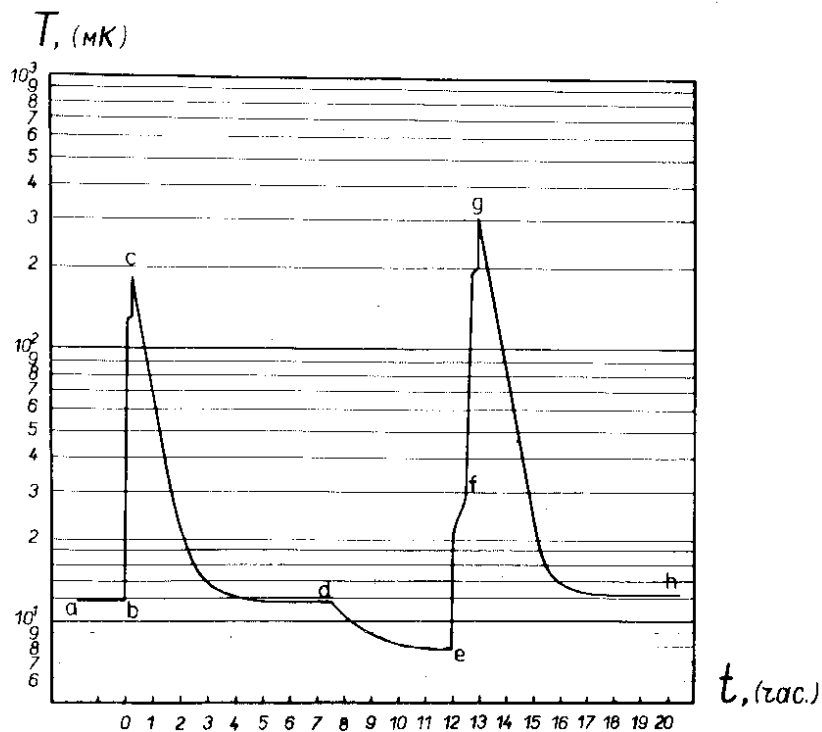


Рис. 5. Диаграмма работы рефрижератора. *ab* - установившийся режим непрерывного охлаждения при скорости циркуляции ${}^3\text{He}$ $Z = 3,4 \cdot 10^{-4}$ моль/с; *bc* - первая смена образца; *cd* - охлаждение нового образца; *de* - режим однократной откачки ${}^3\text{He}$ $Z = 1,2 \cdot 10^{-4}$ моль/с; *ef* - конденсация ${}^3\text{He}$, откачанного на участке *de*; *fg* - вторая смена образца; *gh* - охлаждение, $Z = 3,4 \cdot 10^{-4}$ моль/с.

Последующий анализ полученных данных дает сведения о величине параметров сверхтонкого расщепления и коэффициентов смеси мультипольностей гамма-переходов. Значения параметров сверхтонкого расщепления получаются путем подгонки экспериментальной зависимости функции углового распределения от температуры образца /или от измеряемой асимметрии гамма-излучения ядерного ориентационного термометра/ к теоретической кривой, описываемой уравнением /1/. Кроме того, предложен и создан вариант подгонки экспериментальных данных к теоретическим отношениям коэффициентов $B_k(T)$, чем исключаются систематические ошибки вследствие неопределенностей в степени магнитного насыщения матрицы и в значениях коэффициентов A_k и U_k , входящих в уравнение /1/.

Коэффициенты смеси мультипольностей δ получаются из найденных на основе формулы /1/ экспериментальных значений коэффициентов углового распределения $A_k(\delta)$.

Для описанного анализа данных разработан набор программ, используемый на ЭВМ CDC-6500 /Дубна/ и ICL-4/72 /Прага/. Вся методика измерений и анализа экспериментальных данных была проверена путем сравнения полученных в контрольных экспериментах результатов с литературными данными.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка "СПИН" эксплуатируется в течение двух лет. На ней выполнен ряд методических работ и начаты систематические физические исследования. Работоспособность системы в целом проверялась в экспериментах с изотопами ${}^{160}\text{Tb}$ / $T_{1/2} = 72,1$ дня/ и ${}^{156}\text{Tb}$ / $T_{1/2} = 5,35$ дня/, для которых имеются литературные данные по изучению распада ориентированных ядер^{/28,29/}. Проведены также измерения распада изотопов тербия: ${}^{155}\text{Tb}$ / $T_{1/2} = 5,6$ дн./, ${}^{158}\text{Tb}$ / $T_{1/2} = 2,34$ дн./ и ${}^{150}\text{Tb}$ / $T_{1/2} = 3,5$ ч/.

В установке успешно работает комбинированный рефрижератор растворения, позволивший осуществлять при

сверхнизкой температуре быструю смену экспериментального образца, расположенного в камере растворения. Конструкция рефрижератора позволила также сократить стадию предварительного охлаждения образца, что существенно при исследованиях короткоживущих изотопов.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность В.П.Джелепову, К.Я.Громову и Ю.М.Казаринову за интерес к работе и поддержку. Мы благодарны С.Шафрате за содействие в техническом оснащении установки, С.Р.Аврамову, И.Навратилу и Л.С.Нефедевой - за помощь в создании математического обеспечения и системы обработки информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Де Гроот С. и др. Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия /ред. К.Зигбан/. Атомиздат, М., 1969, т.3, с.309.
2. Blin-Stoyle R.J., Grace M.A. *Handbook of Physics*, vol. 42, p.555.
3. Hamilton W.D. *The Electromagnetic Interaction in Nuclear Spectroscopy* (Ed. W.D.Hamilton, North Holland, 1975, p.645).
4. Krane, K.S. e.a. *Phys. Rev.*, 1971, C4, p.1906.
5. Holmes M.J. e.a. *Nucl.Phys.*, 1973, A199, p.401.
6. Stone N.J. *Hyperfine Interactions*, 1976, 2, p.45.
7. Rao G.N. *Magnetic Dipole and Electric Quadrupole Interaction Data of Dilute Impurities in Metals. International Meeting on Hyperfine Interactions, University of Leuven, Belgium, Heverlee, 1975.*
8. Неганов Б.С. и др. ЖЭТФ, 1966, 50, с.1445.
9. Hall H.E. e.a. *Cryogenics*, 1966, 4, p.80.
10. Громов К.Я. и др. ЭЧАЯ, 1975, т.6, вып. 4, с.971.
11. Мольнар Ф. и др. ЭЧАЯ, 1973, т.4, вып.4, с.1077.
12. Афанасьев В.П. и др. ОИЯИ, 13-4763, Дубна, 1969.
13. Beyer G. e.a. *Nucl.Instr. and Meth.*, 1971, 96, p.437.
14. Тейлор К., Дарби М. Физика редкоземельных соединений. "Мир", М., 1974.
15. Pavlov V.N. e.a. *Cryogenics*, 1978, 18, p.115.
16. Berkes I. e.a. *CERN Report*, 76-13, 1976, p.209.

17. Неганов Б.С. и др. Авторское свидетельство СССР №579508, Бюлл. ОИПОТЗ, 1977, №40, с.117.
18. Павлов В.Н., Коничек Я. ОИЯИ, Р8-11174, Дубна, 1978.
19. Hudson R.P. e.a. *J.Low Temp. Phys.*, 1975, v.20, No. 1/2, p.1.
20. Андерт К. и др. ОИЯИ, Р13-6944, Дубна, 1973.
21. Андерт К. и др. ОИЯИ, 13-7195, Дубна, 1973.
22. Фоминых В.И., Фоминых М.И., Цупко-Ситников В.М. Тезисы докладов XXVII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Ташкент, 1977. "Наука", Л., 1977, с.497.
23. Вылова Л.А. и др. ОИЯИ, Р10-7061, Дубна, 1973.
24. Аврамов С.Р. и др. ОИЯИ, 10-6467, Дубна, 1972.
25. Аврамов С.Р. и др. ОИЯИ, Р10-9741, Дубна, 1976.
26. Rikouška J. e.a. *Radioizotopy*, 1972, 3, p.170.
27. Гаджоков В. ПТЭ, 1970, №5, с.82.
28. Fox R.A. e.a. *J.Phys.*, 1974, A7, p.1716.
29. Uluer I. e.a. *J.Phys. G: Nucl.Phys.*, 1975, 4, p.476.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 марта 1978 года.