

СЗ44.1Г

Н-155

1296 / 1-76

Навратил И. и др.



БЗ-6-9223.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

БЗ-6-9223

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1976

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

И.Навратил, Б.С.Неганов, И.Ота, В.И.Павлов

М.Фингер, В.М.Цупко-Ситников

БЗ-6-9223

УСТАНОВКА «СПИН»

(проект)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

19 03 76

- Дубна, 1975 год -

И.Навратил, Б.С.Неганов, Ю.Ота, В.Н.Павлов,
М.Сингер, В.М.Цупко-Ситников

УСТАНОВКА "С П И Н"
(просит)

А Н Н О Т А Ц И Я

Предлагается установка "СПИН", предназначенная для изучения распада ориентированных ядер. Сочетание техники получения моноизотопных радиоактивных источников в широком диапазоне Z и A на базовой установке ИСНАПП с техникой ориентации ядер при сверхнизких температурах ($\sim 0,01^\circ\text{K}$), полученных методом растворения $^3\text{He} - ^4\text{He}$, в технике детектирования по ядерной спектроскопии. Даются характеристики основных узлов установки. Указывается, что исследования на установке "СПИН" позволяют получить ряд ценных сведений о структуре атомного ядра. Перспективным является также использование этого метода для решения некоторых задач физики твердого тела и физики низких температур.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
I. Введение	1
II. Приложение радиоактивных ориентированных атомных ядер в физических экспериментах	2
III. Принцип работы установки СЛАН	5
IV. Основные части установки СЛАН	9
A) Система для изготовления образцов радиоактивных ядер	9
B) Система для охлаждения образцов до сверхнизких температур и ориентации ядер	10
1. Пригодная установка	10
2. Устройство для создания магнитного поля на образце	14
B) Связочный модуль установки СЛАН	16
1. Основные режимы работы	16
2. Система накопления данных	19
3. Обработка данных	22
V. Некоторые конкретные сведения, которые можно получить при изучении углового распределения гамма-лучей от поляризованных ядер на установке СЛАН	24
VI. Сравнение с другими методами	25
1) Ядерноспектроскопические исследования о ориентированных ядрах	25
2) Доступные ядра и диапазоны элементов, пригодных для исследований методом СЛАН	26

УП. Ресурсы, необходимые для создания установки СММ и примерный календарный график её создания, экспертизы и согласования	29
1) Затраты на оборудование и изготовление установки	29
2) План-график работ	29
3) Экспертизы и согласования	30
Литература	32
Рисунки	33
Приложения	40

1. В в е д е н и е

Одной из актуальных проблем экспериментальной ядерной физики в области исследований структуры ядра на данном этапе является изучение свойств ядер, удаленных от области бета-стабильности. Работы этого направления широко разворачиваются в ОИЯИ по программе ЯСНАПП (ядерная спектроскопия на пучке протонов). Программа ЯСНАПП /1/ предусматривает получение и исследование удаленных от полосы бета-стабильности ядер при облучении мишеней на протонных пучках синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Поставлен целый ряд проблем и задач для научных исследований ядер, удаленных от дорожки стабильности, на втором этапе работы по программе ЯСНАПП /2/. Значение этих проблем не вызывает сомнений. Вместе с тем очевидно, что успех в решении поставленных задач в определенной степени связан с эффективным применением для экспериментальных исследований современной техники и оригинальных экспериментальных установок.

В связи с этим представляет интерес применение для ядерно-спектроскопических исследований по программе ЯСНАПП техники для ориентации радиоактивных ядер и исследования угловых распределений их излучения. В частности, можно поставить на пучке разделенных ионов короткоживущих изотопов установку для ориентации радиоактивных ядер при сверхнизких температурах — установку СПИИ. В этой установке может использоваться сочетание техники имплантации ионов на масс-сепараторе установки ЯСНАПП-П с техникой ориентации ядер при сверхнизких температурах (тысячных градуса Кельвина), получаемых методом растворения ^3He - ^4He , разработанным в ЛЯП ОИЯИ /3/.

Последние достижения в технике детектирования ядерного магнитного резонанса (ЯМР) при помощи ядерного излучения - ЯМР/ЯИ /4/ - указывают на перспективность сочетания на установке СМНН техники ЯМР с техникой ориентации ядер (ОЯ) и таким образом комбинировать преимущества ЯМР с экстремальной чувствительностью детектирования эффектов методом ядерного излучения. Сочетание ЯМР/ОЯ на установке СМНН дает весьма точный метод определения констант сверхтонкого расщепления.

Основными параметрами такого типа установок, которыми в основном будет определяться область радиоактивных ядер, доступных к исследованию на установке СМНН, а также точность результатов измерений, являются:

- 1) достигнутая минимальная температура образцов,
- 2) холодопроизводительность рефрижератора и время выхода образца на температурный уровень,
- 3) эффективность охлаждения образца (теплоотвод) в процессе работы и некоторые другие характеристики.

В частности, в установке СМНН предполагается использовать разработанную в ЛЯП $^3\text{He} - ^4\text{He}$ рефрижераторную систему, модифицированную таким образом, чтобы охлаждать образцы с активностью $(10 + 100)$ мкС до температуры около 10 мК за несколько десятков минут, что позволит проводить эффективное исследование таким методом изотопов с периодами полураспада выше нескольких минут.

В сочетании с установкой ЯСНАМН установка СМНН позволит исследовать свойства распада ориентированных ядер в широком диапазоне Z и A и создать, таким образом, в ЛЯП ОЯИИ условия для систематических исследований угловых распределений излучений от ориентированных ядер, которые пока не имеют конкуренции.

II. Применение радиоактивных ориентированных атомных ядер в физических экспериментах

Основные сведения об ориентации атомных ядер можно получить из изучения угловых распределений и поляризации излучения, испускаемого при распаде ориентированных радиоактивных ядер. Теоретическое рассмотрение проблемы ориентированных ядер проводилось многими авторами (см. например /5,6/). Угловое распределение излучения от ориентированных ядер можно записать как /5,6/:

$$W(\vartheta, T) = \sum_k B_k(T) \cdot A_k \cdot P_k(\cos \vartheta), \quad (1)$$

где ϑ - угол между направлением вылета данного излучения и осью ориентации ядра.

$P_k(\cos \vartheta)$ - полиномы Лежандра,

K - целое число, принимающее четные значения для сохраняющего четность излучения (альфа или гамма излучения), а так же нечетные значения для несохраняющего четность распада (бета-распад).

Величины $B_k(T)$ содержат зависимость от относительных заселенностей $P_m(T)$ подуровней m (см. разд.3) и, таким образом, являются функцией температуры T и взаимодействия ядра с окружающей его средой. Величины A_k зависят только от угловых моментов, характеризующих рассматриваемое излучение. Геометрические свойства процесса распада ориентированных ядер и связанные с ними свойства симметрии имеют непосредственное отношение к разного рода законам сохранения и к форме взаимодействия, приводящего к данному превращению /5/.

Если предположить, что форма взаимодействия известна, а это предположение в настоящее время кажется верным даже для бета-распада, изучение угловых распределений ядерных излучений от ориен-

тированных ядер, подобно как и эксперименты по угловым корреляциям, позволяет установить характеристики внутреннего состояния ядра (спин, четность, магнитный момент и т.п.) и физические свойства ядерного излучения (мультипольность гамма-переходов, характеристики бета-переходов и др.), так как эти характеристики входят явным образом в выражение для углового распределения излучения. В отличие от экспериментов по угловым корреляциям выражение для углового распределения $W(\vartheta, T)$ относится лишь к одному ядерному переходу и поэтому, в принципе, более просто. Очевидным является преимущество такого метода анализа в случаях, когда имеет место только лишь один переход, как например, в случае распада изомерных состояний и т.п. С другой стороны, следует иметь в виду, что дополнительные трудности при анализе угловых распределений излучения от ориентированных ядер возникают при определении параметров, характеризующих ориентацию ядер. Если, однако, ядерные свойства известны из других независимых экспериментов, можно определить степень ориентации ядер и получить тем самым сведения об атомных параметрах или о температуре.

Таким образом, можно отличить три отдельных типа экспериментов с ориентированными ядрами:

Во-первых, это использование свойств ориентированных ядер для изучения разных механизмов ориентации. В этом случае ядро используется как средство для изучения атомных свойств.

Во-вторых, если механизм ориентации известен, изучение свойств распада ориентированных ядер дает информацию о внутренних свойствах ядра.

В-третьих, анализ свойств углового распределения излучения от ориентированных ядер в некоторых случаях может указать на свойст-

ва симметрии и форму взаимодействий, приводящую к ядерному превращению.

III. Принцип работы установки СПИИ

Установка СПИИ предусмотрена, в основном, для измерений асимметрии углового распределения гамма-излучений поляризованных радиоактивных ядер. Несложной модификацией установку можно приспособить для измерений и излучения углового распределения других типов излучения (альфа-, бета-), измерений линейной и круговой поляризации гамма-излучения (продольной или поперечной поляризации бета-частиц), для определения основных характеристик каскадных переходов, возникающих при распаде ориентированных ядер, методом гамма-гамма или бета-гамма корреляций и т.п.

При нормальных условиях угловое распределение излучений от ансамбля радиоактивных ядер изотропно в силу усреднения характерных угловых распределений отдельных видов излучения различных ядер по большому числу случайно ориентированных в пространстве ядер ансамбля. Наложение сверхтонкого расщепления, однако, с одновременным понижением температуры ансамбля может привести к неодинаковым заселенностям ядерных подуровней, что в свою очередь может быть детектировано по анизотропии углового распределения излучения.

Например, если ядро, обладающее магнитным моментом $\vec{\mu}$ находится в магнитном поле \vec{H} , энергия взаимодействия будет равна $-\vec{\mu}\vec{H}$ и магнитные подуровни состояния со спином J разделятся на $(2J + 1)$ энергетических уровней, каждый из которых будет иметь энергию:

$$\begin{aligned}
 E(J_z = m) &= (J_m | H | J_m) = E_0 - (J_m | \vec{\mu} \cdot \vec{H} | J_m) = \\
 &= E_0 - \mu_N \cdot \mu_N \cdot H \cdot m = E_0 - \left(\frac{\mu_N H}{J} \right) \cdot m = E_0 - E_m, \quad (2)
 \end{aligned}$$

В тепловом равновесии заселенности отдельных подуровней m будут пропорциональны фактору Больцмана

$$e^{-\frac{\mu_N H \cdot m}{J \cdot k \cdot T}} \quad (3)$$

При достаточно низкой температуре T заселенности подуровней P_m ядра, находящегося в магнитном поле H могут существенно отличаться от средней заселенности $(2J + 1)^{-1}$. Согласно статистике Больцмана:

$$P_m = \frac{e^{-\frac{E_m}{k \cdot T}}}{\sum_1 e^{-\frac{E_1}{k \cdot T}}} = \frac{e^{-\frac{\mu_N H}{J k T} \cdot m}}{\sum_m e^{-\frac{\mu_N H}{J k T} \cdot m}}, \quad (4)$$

где K - постоянная Больцмана. Это соответствует ядерной поляризации

$$P = \frac{\sum_m m \cdot P_m}{J \sum_m P_m} = \frac{\sum_m m \cdot e^{-\frac{\mu_N H}{J k T} \cdot m}}{\sum_m J \cdot e^{-\frac{\mu_N H}{J k T} \cdot m}} \quad (5)$$

Как видно из этого выражения, для получения заметной поляризации требуется, чтобы $(\mu_N H / J k T) \sim 1$, что, в свою очередь, означает использование очень высоких магнитных полей и сверхнизких температур. Например, если $J = 2$, $\mu = 1$ получаем $(H:T) \sim 5 \cdot 10^7$, что приводит к магнитному полю 500 кгаусс при температуре 10 мК. Достижение этих условий обычными методами оказывается довольно сложным. Сверхпроводящие соленоиды, используемые в некоторых случаях в настоящее время для поляризации ядер методом "грубой

ных ядрах является естественным развитием и дополнением такой концепции. Резонансное поглощение излучения высокочастотного поля приведет к изменению заселенностей магнитных подуровней, что в свою очередь, приведет к изменению углового распределения продуктов ядерного распада. Диапазон частот, который здесь встречается, порядка $10^4 - 10^7$ кгц.

Такой метод поляризации ядер может найти в настоящее время целый ряд важных применений и, как можно надеяться, он будет применен для поляризации ядер в широком диапазоне Z и A . Применение описанного выше метода ориентации ядер ляжет в основу принципа установки СПИИ.

IV. Основные части установки СПИИ

Установка СПИИ должна включать следующие основные узлы (см. рис. I):

- а) - систему для изготовления образцов радиоактивных ядер,
- б) - систему для охлаждения образцов до сверхнизких температур и ориентации ядер,
- в) - физический модуль установки, включающий систему для регистрации информации, управления измерительными операциями на установке на базе малой ЭВМ и систему детектирования ядерного магнитного резонанса.

A. Система для изготовления образцов радиоактивных ядер

Изготовление образцов для ориентации ядер разных радиоактивных элементов, которые будут получены на установке ЯСНАПП, предполагается осуществлять методом имплантации ионов на масс-сепараторе установки ЯСНАПП. При этом должна быть обеспечена достаточ-

разной температуре образцов в диапазоне от минимально доступной до 0,5 К с возможностью наблюдения за температурой и её контролем в процессе измерений.

Время для охлаждения образцов до минимальной рабочей температуры желательно довести до нескольких десятков минут. Эта величина, в основном, будет определять область ядер короткоживущих радиоактивных изотопов, доступных для изучения.

Схема криостата-рефрижератора для установки СМНН представлена на рис.2 и 3. Она состоит из двух основных частей:

а) Собственно гелиевого металлического криостата А с вакуумной кожухом 1 и охлаждаемым азотным экраном 2, в котором, кроме емкости 3, выполненной сверхтекучим гелием, есть еще емкость 4 для нормального гелия, сообщаемая через вентиль 5, дроссель 6 и газовый теплообменник 7 с ванной He II. Подпитывающая емкость с He I дает возможность продолжительно и надежно функционировать всей криостатной системе на необходимой температурном режиме в градусной области без срывов, обычно вызываемых доливкой нормального гелия в ванну со сверхтекучей жидкостью.

б) Отдельной низкотемпературной колонны Б рис.3 для охлаждения образца, рефрижератора $^3\text{He} - ^4\text{He}$, с вакуумными трактами для циркуляции смеси газов по системе, кроме насосной и пультовой части, и всеми теплообменниками и ваннами.

Особенность конструкции данного рефрижератора заключается в том, что специальная система теплообменников имеет сквозное отверстие для прохода трубчатого держателя образца, которое дает доступ непосредственно в ванну растворения. Таким образом, быстро приготовленный радиоактивный образец, помещенный на держателе, можно вводить через герметичный шлюз прямо в тракт откачки пара

³Не в далее в ванну растворения действующего рефрижератора.

Для форсирования стадии предварительного охлаждения образца предусмотрена возможность заливки криогенной жидкости в сам держатель образца с последующей его откачкой и герметизацией.

Время выхода рефрижератора на основной режим работы будет определяться скоростью циркуляции ³Не по системе.

Ожидаемая скорость циркуляции ³Не в макетной системе будет около $5 \cdot 10^{-4}$ моль/сек., что позволяет в соответствии с известными выражениями для теплопроизводительности

$$\dot{Q} = 82 T^2 Z W \quad (6)$$

где T - температурный режим в ванне растворения, К

Z - скорость циркуляции ³Не, моль/сек.

рассчитывать на получение при $T = 0,02$ К мощности охлаждения около 160 эрг/сек.

Особое внимание при создании криогенной установки следует уделить возможным источникам нагрева. В предполагаемых экспериментах с ориентированными ядрами существует возможность дополнительного теплопритока в систему вследствие изменения магнитного поля, наложенного на образец, а также вследствие радиоактивного распада изотопов.

Результаты, полученные в работе /1/ показывают, что вклад в нагрев системы от изменения магнитного поля сильно зависит от условий его изменения и в определенной степени также и от его величины. Согласно оценке, приведенной в работе /1/ изменение магнитного поля на образце (диаметр 1 см, толщина 0,01 см) на обратное за 100 секунд к выделению мощности в образце порядка 10 эрг/сек. Согласно /1/ вращающееся магнитное поле такой же частоты будет нагревать образец с мощностью менее 1 эрг/сек.

Экспериментальные результаты работы / / показали, что вращающееся магнитное поле 1,5 кгаусс с периодом вращения 100 сек не дало заметного нагрева из-за гистерезиса, однако, использование периода вращения 20 сек в том же случае привело к нагреву образца порядка 5 мк. Такие образцы, соблюдение определенных условий изменения магнитного поля не должны привести к нарушению температурных условий установки.

Нагрев вследствие радиоактивного распада связан с выделением энергии при поглощении излучения, сопровождающего радиоактивный распад. Поскольку на установке СМАНП получают преимущественно нейтроннодефицитные изотопы, то основная часть изотопов, которые предполагается исследовать на установке СМАНП, является излучающими позитронов. В этом случае можно записать

$$\dot{Q} \text{ (эрг/сек) } \approx 3 \cdot 10^{-2} \cdot E \text{ (МэВ) } \cdot S \text{ (} \mu\text{с) } \cdot \epsilon \quad (7)$$

где E - граничная энергия позитронного спектра (или взвешенное значение из нескольких компонентов позитронного спектра),

S - активность источника

ϵ - доля позитронного распада в полном распаде ядра.

Даже в экстремальном случае, когда положим $\epsilon = 1$ и для

$S = 100 \mu\text{с}$ и $E = 3 \text{ МэВ}$, полученное значение $\dot{Q} \approx 9 \text{ эрг/сек}$ не превышает предполагаемую холодильную производительность установки.

Как показано в работе / /, подключаемая конструкция отдельных узлов криогенной установки может привести к тому, что нагрев от других возможных источников будет меньше указанных выше двух.

Особое внимание должно быть уделено также созданию хорошего теплообмена между раствором ${}^3\text{He} - {}^4\text{He}$ и радиоактивным источником.

2. Устройство для создания магнитного поля на образце

Поляризация ядер в установке СМАНП достигается при помощи

магнитного сверхтонкого расщепления с использованием внутренних магнитных полей, индуцированных в образцах наложением внешнего магнитного поля при сверхнизких температурах. Направление поляризации определяется внешним магнитным полем.

Внешнее магнитное поле, необходимое для насыщения намагниченности образца (при температурах ниже точки Кюри), предполагается создать при помощи сверхпроводящих катушек. Для измерения очень малых асимметрий гамма-излучения от поляризованных ядер в установке СПИИ предполагается использовать метод, предложенный в работе /8/. В этом методе относительное положение источника излучения и детектора не меняется и угол измерения определяется направлением внешнего магнитного поля. Например, использование вращательного внешнего магнитного поля дает непосредственную возможность измерения углового распределения гамма-лучей.

Для идентификации малых асимметрий в распределении гамма-лучей необходимо, по крайней мере, изменение магнитного поля на обратное для того, чтобы исключить ошибки, связанные с разницей в эффективностях счета в двух детекторах, использованных для регистрации гамма-лучей в противоположных направлениях, или ошибки, возникающей за счет разной геометрии детекторов по отношению к источнику. При низких температурах, однако, резкое изменение направления магнитного поля на обратное может привести к нарушению температурного режима установки за счет нагрева, связанного с токами Фуко. Однако, если использовать вращающееся магнитное поле, можно поддерживать образец в состоянии насыщения намагниченности, когда направление внешнего магнитного поля изменяется. В случае вращающегося поля поляризации ядер адиабатически следует за изменением поля, но изменение поля на обратное может привести к сдвигу поляризации во времени /8/.

Использование вращающегося магнитного поля дает также некоторые преимущества с точки зрения простоты управления и также исключения возможных систематических ошибок по сравнению с периодическим прямым изменением направления магнитного поля на 180° .

Внешнее магнитное поле на образце в установке СПИИ будет создаваться при помощи двух пар перпендикулярно расположенных сверхпроводящих катушек. Для измерения эффектов, при которых достаточно одного лишь измерения $W(\nu)$ в направлении поляризации или перпендикулярно к нему $W(0^\circ)$ и $W(90^\circ)$, стационарное внешнее магнитное поле будет создаваться при помощи только одной пары сверхпроводящих катушек. Для выявления малых эффектов в асимметрии излучения предполагается использование вращающегося магнитного поля, созданного при помощи обеих пар сверхпроводящих катушек и соответствующей системы их питания. Мультианализаторный режим накопления спектрометрической информации в этом случае синхронизован с режимом питания катушек (направлением внешнего магнитного поля). Максимальное внешнее магнитное поле, которое предполагается получить на образце, 20 кгаусс.

В. Физический модуль для установки СПИИ

1. Основные режимы работы.

Для выявления эффектов асимметрии в угловом распределении гамма-лучей от поляризованных ядер на установке СПИИ предполагается использование разностного метода. Экспериментальному определению подлежат интенсивности определенного излучения $W(\nu, T)$ в зависимости от угла регистрации по отношению к направлению поляризации и от температуры образца T . Измерения величины $W(\nu, T)$ предполагается вести одновременно для нескольких углов с детекторами, расположенными в плоскости вращения магнитного поля и пер-

пендикулярно к ней. Особый интерес представляет определение $0^\circ \leftrightarrow 90^\circ$ и $0^\circ \leftrightarrow 180^\circ$ асимметрии, для которых ожидается максимальный разностный эффект. Характерными углами для измерения $W(\nu, T)$ в этом случае, являются $\nu = 0^\circ, 90^\circ$ и 180° .

Характер исследований, которые предполагается вести на установке СПИИ по систематическому изучению свойств как короткоживущих изотопов и объем доступной информации предполагает обеспечение установки автономной системой управления и регистрации информации на базе малой ЭВМ.

Для детектирования гамма-излучения будут применяться Ge (Li)-детекторы со стандартным спектрометрическим трактом, содержащим предусилитель, линейный усилитель и аналого-цифровой преобразователь - АЦП (кодировщик). Получаемая информация будет собираться системой автоматического накопления данных САИЛ.

На установке СПИИ предусматривается три основных типа (режима) измерений: обычный одномерный анализ, одновременное накопление трех независимых спектров и измерение гамма-гамма-совпадений.

а) Одномерный анализ должен обеспечивать следующие условия:
- измерение спектров гамма-излучения радиоактивного источника в диапазоне энергий до 3 МэВ с числом каналов не менее 4096 и емкостью канала 16 бинарных разрядов. Максимальная частота входных импульсов в САИЛ может достигать $5 \cdot 10^4$ имп/сек.

- мониторингирование гамма-спектра, т.е. измерение приращенной гистограммы в определенных интервалах времени в течение эксперимента (1 - 3600 сек). После обработки этих спектров будут получены все периоды полураспада моноизотопных источников.

б) Одновременный анализ трех независимых спектров под разными углами должен включать следующее:

- измерение гамма-спектров под углами 0° , 90° и 180° (4096 каналов по 16 бин. разрядов в каждой). Максимальная частота входных импульсов суммарно от всех трактов не может превышать

$2 \cdot 10^4$ имп/сек.

- мониторингирование гамма-спектра одного спектрометрического тракта также, как в предыдущем типе измерений.

в) Режим гамма-гамма-совпадений (измерение угловых корреляций) должен обеспечивать:

- измерение спектров гамма-гамма-совпадений на разных углах или при вращении магнитного поля с использованием трех детекторов. Спектры совпадений должны измеряться в формате 4096×4096 каналов в неинтегрирующем режиме и должны быть предусмотрены разные интегрирующие режимы с отбором части информации. Предполагаемая частота импульсов совпадений не будет превышать 3000 событий в секунду. Период вращения магнитного поля будет в пределах 100-200 сек.

- мониторингирование гамма-спектра по одному из спектрометрических трактов.

2. Система накопления данных

Система автоматического накопления данных (САНД) должна в течение эксперимента обеспечить:

- накопление данных на магнитную ленту в форме спектров в режимах а) и б) и в форме парных кадров в режиме измерений угловых корреляций,

- измерение общего мертвого времени T_d электронного оборудования,

- отметку времени начала T_n и окончания T_k каждого отдельного измерения, с учетом возможных прерываний по отношению

и времени начала эксперимента $T_a = 0$. Предполагаемое время продолжения эксперимента зависит от периода полураспада радиоактивного источника и может быть в диапазоне от нескольких минут до нескольких минут до нескольких дней.

- изображение избранных участков спектра на дисплее с возможностью взаимодействия между экспериментатором и управляющей частью модуля с помощью светового карандаша, телетайпа.

Блок-схема системы детектирования излучений и систем автоматического накопления данных установки СПИИ показана на рис.4. Предполагается, что все цифровые цепи совместно с АЦП будут изготовлены в стандарте КАМАК и соединены с малой ЭВМ через специальный КАМАК-контроллер. Максимальное мертвое время АЦП не должно превышать 40 мксек на 4096 каналов. Блок для измерения астрономического (текущего) времени - таймер должен работать с минимальным шагом 1 мксек.

САМД будет управляться малой ЭВМ, которая должна удовлетворять следующим требованиям:

- структура процессора должна быть основана не менее, чем на 4-х универсальных программно-доступных регистрах. Процессор должен иметь возможность работать с битовой, байтовой, однословной и многословной структурой данных. Важной чертой процессора должны быть быстрые операции (фиксированного сложения (1-2 мксек), обмен содержимым с ячейками памяти (2-3 мксек) и эффективная система прерывания.

- память не менее 16 К слов (16 бит), время обращения к памяти по порядку 1 мксек.

- устройство входа и выхода должно обеспечить одновременную работу как минимум с двумя периферийными устройствами, независимо от работы процессора. Максимальная скорость обмена данными должна

быть больше, чем 500 К слов/сек.

- ЭВМ должна работать с накопителем на магнитной ленте (НМЛ) и дисплеем для изображения алфавитно-цифровой и графической информации. НМЛ подсоединенные к ЭВМ должны работать в стандарте ЕС (IBM) (9 дорожек, метод записи NRZI, скорость обмена 64 Кбайт/сек, плотность записи минимально 556 знаков/дюйм - 22,2 знаков/см).

- ЭВМ желательно оснастить еще накопителем на магнитных дисках, телетайпом, быстрым фотосчитывателем бумажных перфокарт и графикопостроителем. Используемый магнитный диск должен иметь емкость памяти минимально 2 Мбайт, среднее время доступа 30-50 мсек, скорость обмена 156 Кбайт/сек.

- управляющая ЭВМ модуля должна иметь возможность подключения к ЭВМ более высокого уровня иерархической структуры.

Требования на ёмкость оперативной памяти (ОЗУ) и скорость операции ЭВМ вытекают из характера работы установки СПИП, где надо обеспечить одновременное накопление нескольких спектров по 4096 каналов. На рис.5,6 и 7 показана схема распределения ОЗУ. Память будет разделена на две части: для накопления данных и для программы управления. Ёмкость части для накопления данных (см. рис.5,6,7), которая будет определяющим компонентом для общей ёмкости ОЗУ определяет количество одновременно накапливаемых спектров и их дин. В части ОЗУ, которая предназначена для управляющих программ, должны находиться следующие подпрограммы:

- синтез отдельных спектров
- определение времен T_a и T_d
- вход основных параметров эксперимента
- вычисление температуры радиоактивного источника

- выход на ИМЛ (генерация файлов).

Надо отметить, что все подпрограммы, которые будут работать с ней с входными данными из спектрометрических трактов, должны учитывать специфику обмена между ЭВМ и КАМАК.

Измерение каждого источника гамма-излучения на установке СПИИ будет всегда состоять из серий нескольких отдельных измерений при избранных постоянных параметрах (напряженность и направление магнитного поля, температура). Измерения будут проводиться с использованием следующей методики:

а) перед началом измерений должны быть введены в управляющую ЭВМ основные параметры, при которых будет проводиться измерение, используя простую и наглядную программу ввода через телетайп. Переход в рабочий режим установки СПИИ и его контроль будет осуществляться на основе информации о протекании переходного процесса установки;

б) с началом измерений включается таймер, который будет определять текущее время эксперимента T_a ;

в) в зависимости от режима работы САНД начнет накапливать спектрометрическую информацию в ОЗУ ЭВМ или в режиме измерений совпадений начнется запись информации в необработанном виде на магнитную ленту. Одновременно измеряется и обрабатывается в ЭВМ мертвое время электронного оборудования;

г) в определенных временных интервалах ($0,1$ до $0,01 T_m$), где T_m - время одного отдельного измерения, из одного избранного спектрометрического тракта будет мониторироваться накапливаемый гамма-спектр. Если нужно во время записи этого мониторируемого спектра на внешнюю память прервать эксперимент на время порядка несколько мсек, то вопрос о прерывании будет решаться только после выяснения конфигурации ЭВМ. Желательно, чтобы в это вре-

ны вычислялась и температура замеряемого образца на базе обработки избранных участков спектра.

д) по истечении времени T_m оканчивается первая часть измерения, измеренные спектры переводятся на внешнее ЗУ.

После завершения одного измерения будут изменены некоторые физические параметры эксперимента и после установления нового рабочего режима начнется следующее измерение согласно пунктам а), в) и до д). Во время переходного процесса или прерывания эксперимента управляющая ЭВМ должна совместно с экспериментатором обрабатывать данные от внутренних датчиков криогенной аппаратуры (датчиков температуры T_1 , T_2 и T_3 и датчика магнитного поля) и выдавать информацию о ходе переходного процесса установления нового режима. В течение всех измерений нужно следить за режимом работы криогенной аппаратуры и источников питания магнитного поля. Нужно также обеспечить регулировку криогенной системы — заданную температуру.

В одной полной серии измерений на установке СПИИ может быть получено от 50 до 100 спектров при однопараметрических измерениях или несколько двумерных спектров (4096×4096) при измерении корреляции.

3. Обработка данных

Обработка полученных данных должна проводиться в три этапа:

первый этап — предварительная обработка

второй этап — обработка гамма-спектров

третий этап — обработка физических результатов.

Программы предварительной обработки будут работать с данными, находящимися на магнитной ленте и будут выполнять:

— синтез спектров в случаях, когда информация накапливается

на МЛ без предварительной сортировки,

- приведение зарегистрированных спектров к реальному времени измерений T_{live} на базе измерений мертвого времени электроники

$$T_{live} = T_m - T_d .$$

- Обработка мониторируемых спектров, т.е. определение относительного количества ядер и периода полураспада отдельных изотопов, содержащихся в радиоактивном источнике.

- Приведение всех окончательных спектров к времени начала измерения $T_0 = 0$ на основе оцененных периодов полураспада и количества ядер в образце.

- Генерирование выходных файлов, подходящих для дальнейшей обработки.

Для выполнения предварительной обработки на уровне измерительного модуля управляющая ЭВМ обязательно должна быть оснащена двумя внешними запоминающими устройствами на базе магнитных лент и магнитных дисков. Предполагается, что МЛ будет основным регистрирующим устройством САИД и магнитный диск будет в основном предназначен для хранения системы мат.обеспечения и сортировки спектров совпадений.

Измеренные и предварительно обработанные спектры на втором этапе обрабатываются по стандартным программам обработки гамма-спектров. Процесс обработки будет иметь несколько особенностей: основное внимание будет уделяться одиночным пикам с хорошей статистикой и очень точному вычислению их интенсивностей. Выходная информация обработки гамма-спектров должна быть выведена не только на печать, но и в пригодной форме для дальнейшей обработки, т.е. записана на МЛ для переноса или передачи на другие ЭВМ.

Окончательная обработка будет производиться на основе результатов, полученных в предыдущем этапе. Обработка будет содер-

вать вычисление измеряемых физических величин по теоретическим формулам.

V. Некоторые конкретные сведения, которые можно получить при изучении углового распределения γ -лучей от поляризованных ядер на установке СПИИ

Существует целый ряд сведений, которые, в зависимости от постановки эксперимента, были или могут быть с успехом получены при помощи измерений углового распределения гамма-лучей от поляризованных ядер /4-II/. Среди них, в частности, можно отметить следующие:

- установление характера мультипольности исследуемого излучения,
- определение параметров смешивания разного типа мультипольностей в исследуемом переходе,
- определение спинов и четностей энергетических уровней в схемах распада,
- исследование разрядных свойств энергетических уровней на основном состоянии и разрядных свойств состояний с одним только переходом, в частности, некоторых изомерных состояний,
- определение отношения матричных элементов в бета-переходах, предшествующих гамма-переходу, в частности, определение отношения матричных элементов Ферми и Гамова-Телера,
- определение величины энергии магнитного сверхтонкого расщепления $\Delta = \mu_N H : Jk_B$. В случае, когда магнитное поле H известно из независимых опытов, метод позволяет определить магнитный момент ядра и наоборот,
- изучение эффекта переориентации,
- Изучение эффектов, связанных с несохранением четности,

- измерение сверхнизких температур.

VI. Сравнение с другими методами

Ясно, что описать здесь подробно критическое сравнение данного экспериментального подхода к изучению свойств распада ядер с другими методами ядерной физики, как изучение угловых корреляций, изучение возбужденных угловых корреляций или использование эффекта Мессбауэра, ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и т.п. во всех отдельных случаях невозможно. Все эти методы дополняют друг друга и все они имеют свои преимущества и свои недостатки. Существует, однако, несколько важных пунктов, на которых следует здесь коротко остановиться /12/.

I. Ядерноспектроскопические исследования с ориентированными ядрами (ОЯ)

Как указывалось выше, в отличие от экспериментов по угловым корреляциям, изучение углового распределения излучения ОЯ предполагает в нормальной постановке задачи измерение только лишь одиночных спектров, и поэтому, в принципе, более просто. Это в свою очередь означает, что для анализа доступны относительно малые активности источника (порядка $0,1-10$ микрокюри), и уже при малых экспозициях можно получить хорошую точность результатов и эксперименты могут быть выполнены с ничтожно малыми количествами растворенного в матрице элемента. Измерения возможны при концентрациях активного элемента до 10^{-10} .

Для опытов по ядерному магнитному резонансу на ориентированных ядрах (ЯМР/ОЯ), когда измеряется скорость счета в зависимости от частоты, необходимо использовать радиоактивные источники с активностью на порядок выше. Таким образом, диапазон доступных для изучения концентраций элементов в ЯМР/ОЯ гораздо шире, чем в слу-

чае обычного ЯМР, благодаря экстремальной чувствительности и избирательности метода детектирования ЯМР при помощи ядерного излучения.

При использовании метода ОЯ для ядерноспектроскопических исследований можно проводить изучение всего спектра излучения одновременно и, в частности потому, этот метод, способен полностью использовать преимущества высокого разрешения полупроводниковых детекторов ядерного излучения для изучения сложных схем распада, несмотря на низкую эффективность регистрации таких детекторов.

С формальной точки зрения методика ориентации ядер и методика угловых корреляций похожи, поскольку касаются чисто геометрической стороны ядерных процессов. Их можно рассматривать как специальный случай более общей задачи получения полного набора данных по угловому распределению и поляризации всех частиц и излучения, имеющих место в ядерной превращении. Существуют случаи, когда эти два метода могут заменить друг друга, однако, имеется ряд случаев, когда только один из этих методов может дать ответ. Что касается метода ОЯ, то при современном уровне экспериментальной техники можно поставить целый ряд новых интересных экспериментов в области ядерной физики и физики твердого тела. Изучение угловых корреляций и поляризации излучения от ориентированных ядер является естественным развитием этой концепции.

2. Доступные ядра и диапазон элементов, пригодных для исследования техникой ОЯ

При ОЯ и ЯМР/ОЯ измеряют взаимодействия в основном состоянии радиоактивных материнских ядер в отличие от техники возмущенных угловых корреляций и техники Мессбауэровской спектроскопии, которые используют возбужденные состояния дочерних ядер.

Поэтому измерения этих же самых переходов при использовании различной техники даст дополнительные сведения о сверхтонком взаимодействии на соседних элементах.

- При ОЯ и ЯМР/ОЯ ограничения на период полураспада $T_{1/2}$ радиоактивного элемента, доступного к изучению, связаны с :
- а) требованием на время достижения сверхнизкой температуры образца (время релаксации),
 - б) требованием на время приготовления образца

Условия, которые будут созданы в этом направлении на установке СМНН, позволят проводить эффективное исследование изотопов с периодом полураспада выше нескольких минут. В случаях цепочек радиоактивного распада, начинающихся из долгоживущего изотопа, могут изучаться ядра и изомерные уровни со временем жизни порядка секунд. Необходимо иметь ввиду также дополнительные ограничения наложенные на спин ориентированного ядра, которые приводят к возможным значениям спина таких ядер $I \geq 1$ для сохраняющего четность излучения и $I \geq 1/2$ для несохраняющего четность излучения.

Условия для ориентации ядер, наложенные указанными ограничениями, удовлетворятся большим количеством изотопов большой группы элементов таблицы Менделеева, которые получаются на установке ЯСНАПП. В таблице, приведенной на рис. 8 для наглядности отмечены элементы, на изотопах которых уже были выполнены эксперименты методом ОЯ. На установке СМНН, как можно ожидать, диапазон этих элементов еще расширится. Доступен к исследованию будет также ряд изотопов, указанных элементов. Важно также подчеркнуть, что в случае таких элементов как: Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, As, Se, Br, Zn, Nd, Mo, Pd, Cd, In, La, Ce, B не существуют подходящие изотопы с переходами, пригодными для Мессбауэровской спектроскопии. Благодаря своей вы-

сокой чувствительности метод Ом особенно пригоден для работы с трансуроновыми элементами и ядрами, удаленными от линии бета-стабильности, которые доступны в очень малых количествах, и в силу чего использование других методов затруднено.

Для ядер, пригодных для Мессбауэровской спектроскопии, новые перспективы открываются при использовании техники изучения эффекта Мессбауэра на ориентированных ядрах.

УП. Ресурсы, необходимые для создания установки
и примерный календарный график создания
установки СМН, экспертизы и согласования

I. Затраты на оборудование и изготовление установки

Затраты, связанные с созданием системы для изготовления и имплантации радиоактивных изотопов и затраты на капитальное строительство (помещения) включены в план расходов по созданию установки ЯСНАТ-2, т.к. эти системы будут использованы и в других целях.

Смета затрат на оборудование и материалы, необходимые для проведения работ по созданию установки СМН для исследований на сильноточном фазатроне ЛМН (установка "А") приведена в приложении I. Физико-техническое обоснование на установку СМН приведено в приложении 2. Расходы на создание установки СМН распределяются следующим образом:

1. Криогенная установка	- 38532 руб
2. Система ядерного магнитного резонанса	- 19000 руб
3. Ядерно-спектрометрическая аппаратура и ЭВМ	- 188045 руб
4. Материалы	- 34363 руб

XXXV сессия Ученого совета ОИЯИ включены в Проблемно-тематический план ЛЯП ОИЯИ (тема № 2-018-0385-74). Осуществление второго этапа работ по созданию установки СМНН связано с реконструкцией синхротрона ЛЯП в сильноточный ускоритель, в частности, потом с созданием "он-лайн"-установки ЯСНАПП-2. План-график работ по созданию установки СМНН предполагает осуществление второго этапа работ в следующем пятилетии - 1976-1980 гг.

Имеется предварительная договоренность о проведении проектных и конструкторских работ и об изготовлении части уникального оборудования в Чехословакии.

Литература

1. Р.Арль и др. "Программа ЯСНАП" (Итоги работ и перспективы), СМ 2-676, ОИЯИ, Дубна, 1972 г.
2. а. К.Я.Громов, М.Фингер "О задачах научных исследований на втором этапе программы ЯСНАП". Доклад на первой сессии Комитета по структуре ядра Ученого совета по физике низких энергий ОИЯИ, Дубна, 1973 г.
- б. М.Фингер "Перспективы исследований ориентированных ядер по программе ЯСНАП" Доклад на второй сессии Комитета по структуре ядра Ученого совета по физике низких энергий, ОИЯИ, Дубна, 1973 г.
3. Б.С.Петанов, И.Борисов, М.Шибурт. ESTM, 23 (1966), 959.
4. B.Olsen et.al., Phys.Rev., A4(1972)1626 and references given there.
5. С.де Гроот и др. Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия (ред. К.Шибан), Атомедат, М.1969, т 3 стр. 309.
6. R.J.Blin-Stoyle and M.A.Grace. Handbook of Physics, Vol.42 p.555.
7. N.J.Stone. In "Hyperfine Interactions in Excited Nuclei" (Eds. G.Goldring and R.Kalish) Gordon and Breach 1(1971) 237.
8. K.S.Krane et.al., Rev.Sci.Instr.42(1971)1475.
9. C.A.Kalfas et.al., Nucl.Phys., A196(1972)615.
10. D.D.Warner et.al., J.of Phys.3,Nucl.Phys.,I,1(1975)95.
11. M.Finger et.al., Acta Polyt.CVUT Prague IV,3(1974)49.
12. N.J.Stone. At.Energy Rev., V12,4(1974)585.