



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Д13-98-146

В.Ф.Борейко, В.М.Быстрицкий, В.И.Дацков,
А.Дел Россо¹, Р.Жакот-Гуиллармод¹, Ф.Мульхаузер¹,
В.Н.Павлов, Л.А.Ривкис², В.А.Столупин, А.Н.Федоров

НОВАЯ КРИОСТАТ-МИШЕНЬ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ МЮОНАМИ

Направлено в журнал «Nuclear Instruments and Methods»

¹Институт физики Фрибургского университета, Швейцария

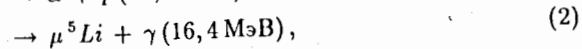
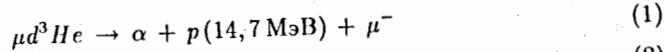
²Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А.Бочвара, Москва

1998

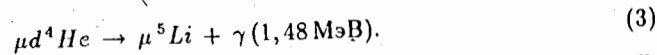
Введение

Изучение процесса образования несимметричных мюонных молекул μxZ (где $x \equiv p, d, t; Z \equiv He, Li, Be$) и реакций синтеза ядер атомов молекул началось примерно 15 лет назад. В последние пять лет возрос интерес теоретиков и экспериментаторов к этим исследованиям [1-13]. На данном этапе исследований более предпочтительным в плане технической реализации является изучение процесса мюонного катализа реакций ядерного синтеза (μCF) в дейтерий-гелиевой смеси.

Реакция синтеза ядер зарядово-несимметричного молекулярного комплекса μd^3He может происходить по двум каналам



в то время как синтез ядер μd^4He - по единственному каналу



Для получения информации о характеристиках данного процесса экспериментальная установка должна обеспечивать возможность регистрации продуктов ядерного синтеза в мюонных комплексах μd^3He и μd^4He , электронов от распада мюонов, а также мюонного рентгеновского излучения с энергией 6,85 кэВ, возникающего в результате радиационного распада указанных комплексов. Регистрация с высокой эффективностью протонов с энергией 14,7 МэВ, имеющих достаточно малый пробег в веществе, а также мягких γ -квантов с энергией 6,85 кэВ, является весьма деликатной задачей.

Следует отметить, что характеристики некоторых процессов, входящих в цепочку мюонного катализа dHe -реакции, существенным образом зависят от плотности и температуры среды. Поэтому, для корректной интерпретации экспериментальных данных, необходима высокая стабильность температуры мишени и давления находящегося в ней газа. К чистоте дейтерий-гелиевой смеси также предъявляются очень высокие требования - суммарное содержание примесей (N_2, O_2, H_2O, CO_2 и т.д.) не должно превышать 5×10^{-7} объемных долей (об. дол.). Таким образом, для детального изучения процесса мюонного катализа в дейтерий-гелиевой смеси необходимо создать целый комплекс устройств, обеспечивающих реализацию требуемых условий.

Целью настоящей работы являлось создание мишени, а также системы ее газообеспечения и термостатирования для исследования мюонного катализа dHe -реакции в ($D_2 + He$)-смеси в диапазоне давлений 0 - 10 атм и температур 21 - 300 К [12].

С использованием созданной установки на мезонной фабрике PSI (Швейцария) совсем недавно были проведены двухнедельные тестовые измерения как с чистым дейтерием, так и с дейтерий-гелиевой смесью при давлениях 5,6 - 6,4 атм и температуре 32 К.

При разработке и создании криостат-мишени учитывался и ряд других, кроме перечисленных выше, требований, выполнение которых необходимо для проведения экспериментов по исследованию μCF в дейтерий-гелиевой смеси.

Общий вид криостат-мишени приведен на рис. 1. Криогенная газовая мишень (1) расположена внутри вакуумного кожуха криостата (2), выполненного из листовой нержавеющей стали толщиной 2 мм. В качестве материала корпуса мишени выбран алюминиевый сплав АД1 (состав сплава: Al > 99,3%, Fe < 0,3%, Si < 0,3%, Cu < 0,05%, Mn < 0,025%, Zn < 0,1%, Ti < 0,05%, Mg < 0,05%). Мишень выполнена в виде сферы диаметром 66 мм. Объем мишени составляет ≈ 250 см³. Использование алюминия позволяет почти полностью подавить фон, обусловленный характеристическим излучением вещества стенок мишени. Так как в спектре излучения алюминия отсутствуют γ -кванты с энергией вблизи 6,85 кэВ, в то время как в спектре излучения нержавеющей стали, например, имеются γ -кванты с энергией, очень близкой к энергии регистрируемого в эксперименте мюонного излучения 6,85 кэВ.

В корпусе мишени имеется 5 окон, изготовленных из каптона. Диаметр окон обусловлен размерами расположенных вокруг мишени детекторов. Толщина каптоновых окон определялась по результатам предварительно проведенной серии испытаний, в которой варьировалось не только давление газа, но и температура мишени. Проведенные испытания позволили создать мишень с рабочим давлением дейтерий-гелиевой смеси до 10 атм. Это обеспечивало высокую скорость остановок мюонов в мишени, а, следовательно, и высокую скорость набора экспериментальных данных. Диаметр и толщина входного окна мишени в направлении мюонного пучка составляют 40 мм и 135 мкм, соответственно. В плоскости, перпендикулярной направлению мюонного пучка, расположены 4 окна: три предназначены для регистрации протонов из реакции d^3He -синтеза (диаметр - 45 мм, толщина - 135 мкм) и одно - для регистрации мюонного рентгеновского излучения (диаметр - 15 мм, толщина - 55 мкм).

При указанных выше размерах окон мишень способна выдержать давление газа 13 атм при температуре 77 К. Было также установлено, что диффузия дейтерия или гелия через окна из каптона пренебрежимо мала, что, в свою очередь, крайне важно для корректной интерпретации экспериментальных данных (исключается необходимость введения поправок на изменение плотности мишени во время измерений). Уплотнение каптоновых окон на корпусе мишени осуществляется с помощью индиевых прокладок и прижимных фланцев (3) из нержавеющей стали.

Используемые для регистрации протонов из реакций синтеза в μd^3He -молекулах Si-детекторы (4) (диаметр - 42 мм, толщина 4 - мм) укреплены на корпусе мишени в непосредственной близости от каптоновых окон. Высоковольтное питание Si-детекторов и съем сигналов с них осуществляется через герметичные разъемы, установленные в стенке вакуумного кожуха. Температура Si-детекторов не должна быть ниже 40 К [14]. Это требование обусловлено тем, что амплитуда сигнала

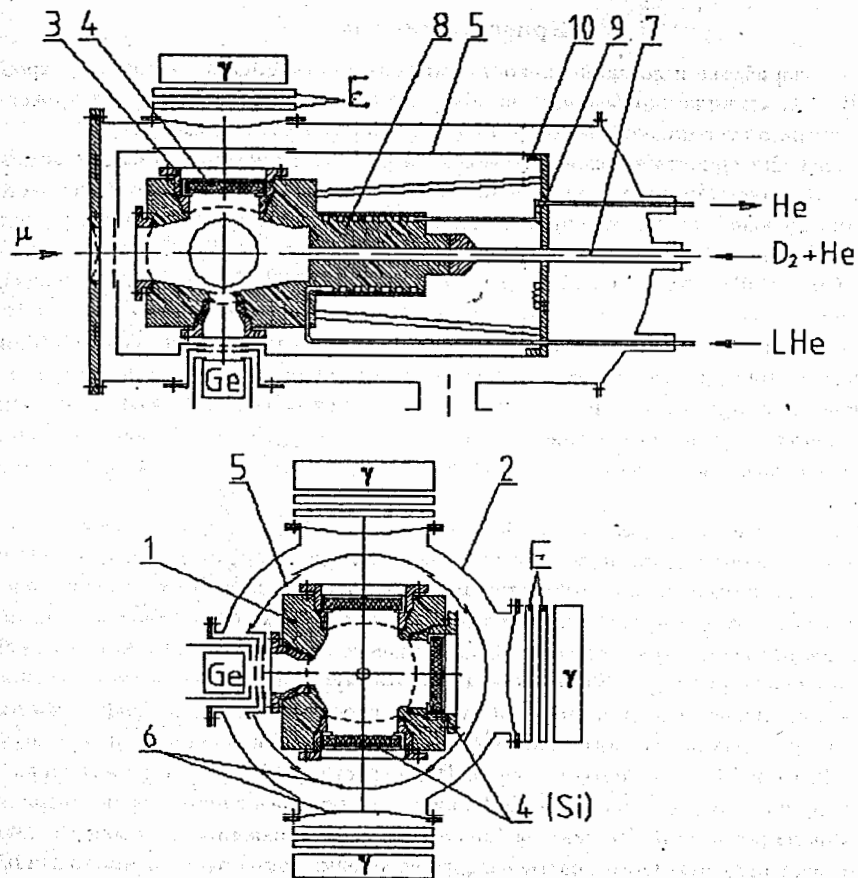


Рис. 1. Принципиальная схема криостат-мишени.

1 - корпус мишени; 2 - вакуумный кожух; 3 - прижимной фланец; 4 - кремниевый детектор; 5 - тепловой экран; 6 - окно из алюминия; 7 - трубка для заполнения мишени газом; 8 - теплообменник; 9 - трубчатый теплообменник; 10 - монтажный фланец теплового экрана; E, γ - детекторы для регистрации электронов от распада мюонов и жестких γ -квантов из реакции синтеза в dHe -молекуле; Ge - германиевый детектор для регистрации мюонного рентгеновского излучения с энергией 6,85 кэ

на выходе Si-детектора при температуре ниже 40 К катастрофически уменьшается (примерно в 5 раз), по сравнению с амплитудой сигнала при температурах $T > 40$ К.

Для уменьшения теплопритока к мишени за счет теплового излучения стенок вакуумного кожуха внутри него установлен тепловой экран (5) из меди толщиной 1 мм. В тепловом экране предусмотрены окна из майлара толщиной 12 мкм с алюминиевым покрытием (≈ 1 мкм), как в направлении мюонного пучка, так и в направлении Ge-детектора (см. рис.1). Кроме того, напротив Si-детекторов имеются окна из алюминия толщиной 0,3 мм.

В вакуумном кожухе (2) имеются два каптоновых окна: одно в направлении мюонного пучка (диаметр - 40 мм, толщина - 55 мкм), другое перед Ge-детектором (диаметр - 20 мм, толщина - 25 мкм), приклеенные эпоксидным клеем или уплотненные с помощью прижимных фланцев. В стенке вакуумного кожуха перед детекторами, расположенными вокруг мишени и предназначенными для регистрации электронов от распада мюонов, жестких γ -квантов из реакции dHe -синтеза, а также нейтронов, предусмотрены окна из алюминия (6) толщиной 0,5 мм. Уплотнение данных окон осуществлялось с помощью прижимных фланцев и прокладок из витона.

Заполнение мишени дейтерием, гелием либо их смесью производится по трубке (7). Охлаждение мишени осуществляется потоком жидкого гелия (в области температур 21 - 70 К) либо жидкого азота (70 - 300 К), проходящим последовательно через теплообменник мишени (8) и теплообменник (9), установленный на монтажном фланце (10). Таким образом, охлаждение узлов криостат-мишени осуществляется одним общим потоком хладагента. Откачка хладагента осуществляется с помощью вакуумного насоса производительностью ≈ 20 л/с.

Система термостатирования мишени

С помощью системы термостатирования осуществляется контроль и измерение температуры мишени, теплового экрана и детекторов. В основу системы термостатирования положен компенсационный метод, основанный на сравнении периодически измеряемого значения температуры мишени с заданным: при понижении или повышении температуры относительно наперед заданного значения происходит соответственно увеличение либо уменьшение мощности нагрева мишени. В данной системе для измерения температуры мишени, теплового экрана и кремниевых детекторов используются калиброванные угольные термометры ТВО [15], установленные непосредственно на перечисленных элементах. С целью повышения точности измерения токовые и потенциальные выходы всех термометров пропускаются через специальные термализаторы, приклеенные к поверхности контролируемых узлов с помощью клея Stycast 1266.

Калибровка термометров проводилась на специальном стенде в диапазоне температур 4 - 300 К по методике [15]. Точность калибровки в интервале температур 4 - 70 К составляла $\pm 0,02$ К, а в интервале 70 - 300 К - 0,1 К. Вариация температуры мишени при заданной скорости откачки хладагента осуществляется

с помощью электрического нагревателя из константановой проволоки диаметром 0,15 мм. Нагреватель приклеен к корпусу мишени по ее периметру клеем Stycast 1266. Сопротивление нагревателя составляет 92 Ом при температуре 32 К.

На рис.2 приведена функциональная схема системы термостабилизации. Информация о температуре (соответствующее значение напряжения на датчике температуры TS) через систему КАМАК передается в компьютер. Температура, соответствующая данному значению напряжения на датчике, определяется с помощью выражения:

$$T = K_1 + K_2 \times (1000/R) + \dots + K_7 \times (1000/R)^6 + \dots, \quad (4)$$

где K_i - коэффициенты полинома, найденные в результате калибровки соответствующего термометра; R - сопротивление термометра. При понижении температуры ниже заданного уровня происходит увеличение мощности нагрева мишени путем повышения напряжения на нагревателе (H) с помощью преобразователя код - амплитуда (DAC). В случае же превышения заданного уровня температуры мишени происходит уменьшение мощности подогрева аналогичным путем.

Последовательность процедур, выполняемых с помощью системы термостатирования, представляет собой четыре цикла измерений. В первом цикле мультимплексора активизируется датчик температуры экрана (SS) (датчик включается в измерительную цепь) и с помощью ADC производится измерение напряжения на нем. Во втором и третьем циклах аналогичным образом измеряется напряжение на датчиках температуры мишени (TS) и кремниевого детектора (DS), соответственно. В четвертом цикле мультимплексора на вход ADC подается напряжение с образцового резистора, по которому протекает измерительный ток датчика давления газа в мишени (PG). Ко входу мультимплексора (M) подключен также ряд датчиков давления, установленных в системе газообеспечения мишени. Использование датчика давления газа в мишени позволяет осуществлять дополнительный прецизионный контроль за температурой мишени (учитывая однозначную связь между температурой и давлением), а датчиков в системе газообеспечения мишени - осуществлять приготовление дейтерий-гелиевой смеси в необходимой пропорции компонентов.

Мультиплексор (M), стабилизированный источник тока (на рис.2 не показан) и усилитель (A) находятся в одном блоке, расположенном непосредственно на корпусе криостата и соединенном с адаптером КАМАК многожильным кабелем длиной ~ 15 м. Следует отметить, что алгоритм управляющей программы позволяет осуществлять стабилизацию термодинамических параметров мишени с использованием как термодатчика (TS), так и датчика давления газа в ней (PG).

Результаты тестового эксперимента, выполненного с чистым дейтерием и дейтерий-гелиевой смесью при температуре 32 К, свидетельствуют о том, что данная система термостатирования обеспечивает стабилизацию температуры мишени с точностью $\pm 0,05$ К при требуемой по условиям эксперимента стабильности $\pm 0,1$ К.

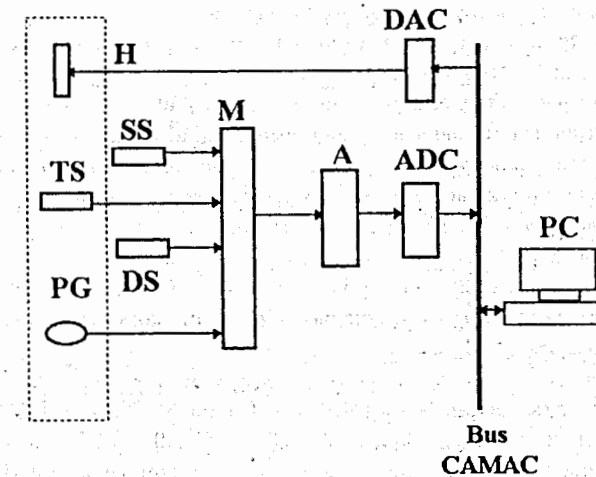


Рис. 2. Функциональная схема системы термостабилизации. TS, SS, DS - датчики температуры мишени; экрана, кремниевого детектора, соответственно; H - нагреватель; PG - датчик давления мишени; M - мультиплексор; A - усилитель; ADC - аналого-цифровой преобразователь; DAC - цифро-аналоговый преобразователь; PC - персональный компьютер

Ловушки (IM2) и (CT) предназначены для регенерации ^3He из дейтерий-гелиевой смеси и анализа содержимого мишени на суммарное содержание примесей, соответственно. Ловушка (IM2) заполнена интерметаллическим соединением $\text{ZrCo}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}$ [19], а конструкция ее аналогична конструкции ловушки (IM1). Активирование $\text{ZrCo}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}$ проводилось по технологии, описанной выше для активирования ИМС ZrCrFe . Ловушка (CT) заполнена активированным углем АГ-4 и имеет объем 10 см^3 . На входе и выходе ловушки (CT) установлены металловолоковые фильтры из пержавающей стали. Перед использованием ловушки (CT) производится ее вакуум-термическая тренировка при температуре 200°C с откачкой остаточных газов до давления меньше 10^{-5} Торр.

Вакуумная откачка криостат-мишени и системы ее газообеспечения осуществляется с помощью турбомолекулярного насоса (TP) "Alcatel 5150" и форвакуумного насоса (FP) "Alcatel 2004A", позволяющих производить вакуумирование мишени и соединительных коммуникаций до давления порядка 10^{-8} Торр. Для предотвращения попадания паров масла в криостат-мишень и в систему газообеспечения на входе форвакуумного насоса установлена холодная ловушка (LNT), погруженная в жидкий азот. На мишени установлен предохранительный клапан (VSV) для предотвращения разрыва каптоновых окон при превышении давления в ней выше заданного уровня. При срабатывании предохранительного клапана происходит сброс содержимого мишени через клапан (VGS) в ресивер (SV) объемом 2 л.

Все коммуникации системы газообеспечения выполнены на основе гибких металлических сильфонных рукавов и трубок из нержавеющей стали. В системе используются только металлические сильфонные клапаны, позволяющие проводить работу при давлении газа до 200 атм и температуре до 200°C . Перед использованием системы газообеспечения производилась ее вакуум-термическая тренировка. Критерием окончания вакуум-термической тренировки является степень газовой выделенности во внутренний объем соединительных коммуникаций и отдельных узлов системы, которая не должна превышать уровня $\sim 10^{-7}$ л·Торр/ч (данный уровень газовой выделенности гарантирует получение дейтерий-гелиевой смеси требуемой чистоты).

В системе для приготовления газовой смеси дейтерия и гелия в определенной пропорции с точностью не хуже 0,5% предусмотрен мерный сосуд (MV) (объем сосуда равен $1043,3 \pm 0,3\text{ см}^3$). Давление газа в сосуде (MV) измеряется с помощью датчика давления (PG2), позволяющего осуществлять измерения с точностью не хуже 0,2%.

Основные этапы приготовления дейтерий-гелиевой смеси следующие. Вначале производится заполнение мерного сосуда (MV) необходимым количеством гелия. При этом гелий из сосуда (НВ1) или (НВ2) через ряд клапанов поступает в (IM1), а затем - в сосуд (MV). Давление гелия в ловушке (IM1) измеряется с помощью датчика давления (PG3). Использование интерметаллического соединения ZrCrFe позволяет производить очистку гелия от примесей до концентрации менее 10^{-9} об. дол. при потоке гелия через ловушку $\approx 30\text{ см}^3(\text{н.у.})/\text{с}$ [18]. Затем в сосуд (MV) добавляется необходимое количество чистого дейтерия. При этом дейтерий из бал-

лона (DB) через ряд клапанов поступает в ловушки (MS1) и (MS2), а затем - в сосуд (MV). Давление газа в ловушках измеряется с помощью манометра (M) и датчика давления (PG5).

После заполнения сосуда (MV) требуемыми газовыми компонентами его содержимое выдерживалось несколько часов для достижения их равномерного перемешивания. Пауск дейтерий-гелиевой смеси в мишень производится через клапан (VT1), а удаление смеси из мишени - через клапан (VTO). Следует отметить, что перед заполнением мишени дейтерий-гелиевой смесью производится промывка ее и связанных с ней газовых коммуникаций смесью находящихся в сосуде (MV) газов. Для этого в мишень выпускается небольшое количество газовой смеси из сосуда (MV) с последующей высоковакуумной откачкой. После окончания промывки производится заполнение мишени газовой смесью до необходимого давления (0 - 10 атм).

По окончании экспозиции на пучке мюонов производится регенерация ^3He из дейтерий-гелиевой смеси. Дейтерий-гелиевая смесь из мишени через клапан (VTO) поступает в ловушку (IM2), а затем - в гелиевый ресивер (HR) объемом 2 л. При пропуске дейтерий-гелиевой смеси через ловушку (IM2) находящуюся в ней интерметаллическое соединение эффективно поглощает дейтерий, в результате чего на выходе ловушки оказывается практически чистый ^3He . Повторное использование ловушки (IM2) производится после удаления из нее сорбирующего дейтерия при нагреве ловушки до 750°C и откачке выделяющихся из нее газов до давления меньше 10^{-5} Торр.

Измерение содержания примесей в дейтерий-гелиевой смеси, находящейся в мишени, производится следующим образом. Содержимое мишени пропускается через ловушку (CT), погруженную в жидкий азот, и откачивается из нее форвакуумным насосом до остаточного давления газа в ней менее 10^{-3} Торр. Затем ловушка нагревается до комнатной температуры. В результате нагрева происходит выделение примесей, сорбированных активированным углем. Количество примесей определяется путем измерения давления газа с помощью датчика давления (PG6). Состав газов определяется с помощью квадрупольного масс-спектрометра (RGA) "Vacscan". Использование ловушки с активированным углем позволяет, в принципе, измерять содержание примесей в дейтерий-гелиевой смеси на уровне 10^{-8} об. дол. [20].

Динамика работы криостат-мишени

На рис.4 приведена полная временная диаграмма работы криостат-мишени. Для наглядности весь временной интервал разбит на пять подинтервалов, каждый из которых отражает характеристики, соответствующие определенным этапам работы трех основных частей криостат-мишени: криогенной мишени, теплового экрана и Si-детекторов.

Этап предварительного захлаживания (а) криостат-мишени жидким азотом, поступающим в криостат из дьюара, не превышает 2 часов. По окончании данного этапа температура мишени становится равной $\sim 70\text{ К}$. В процессе замены хладагента (интервал (б)) криостат-мишени (жидкий азот \rightarrow жидкий He) происходит

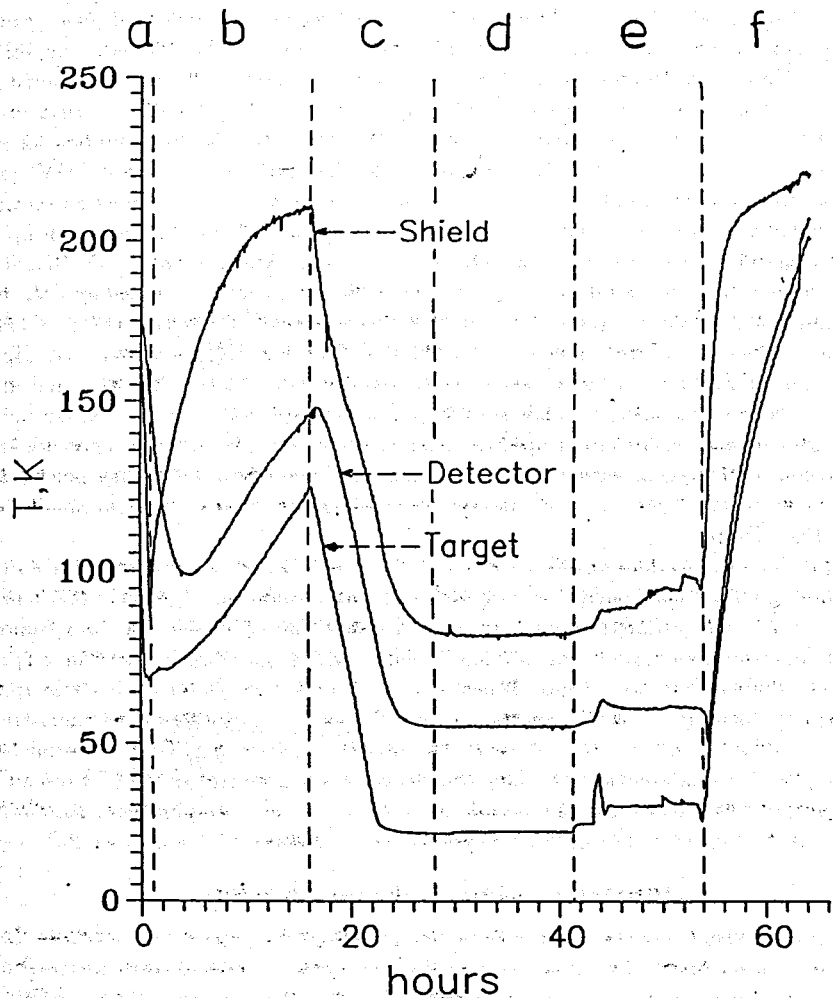


Рис. 4. Динамика работы криостат-мишени.

прерывание процесса охлаждения, приводящее к медленному отеплению всех частей криостата, находящихся внутри вакуумной рубашки. Как видно, переключение систем охлаждения криостат-мишени несколько снижает темп охлаждения узлов криостата (см. интервал (с)). При этом соответствующая минимально возможная температура для каждого узла криостат-мишени может быть достигнута примерно через 6 часов. Следует отметить, что установившееся тепловое равновесие в криостат-мишени характеризуется фиксированным перепадом температур между корпусом мишени, Si-детекторами и тепловым экраном.

Интервал (d) соответствует процедуре заполнения мишени дейтерий-гелиевой смесью и выбору величины мощности нагрева мишени, обеспечивающей необходимый уровень стабилизации температуры, требуемой по условиям эксперимента. Очень важным обстоятельством является то, что и в течение данного этапа разность температур между Si-детектором и мишенью остается постоянной, а значение температуры Si-детектора заведомо выше 40 К. Переход системы термостатирования на режим, соответствующий более высокой температуре мишени, при которой необходимо иметь требуемый уровень стабилизации, достигается за весьма короткое время (см. интервал (e) на рис.4). Время естественного утепления криостат-мишени составляет более 2-х суток. Форсированный отогрев криостат-мишени (интервал (f)) возможен при прекращении циркуляции хладагента и заполнении вакуумной рубашки гелием до давления ~ 200 Торр. В этом случае время отогрева мишени составляет около суток.

Результаты двухнедельного тестового эксперимента на мезонной фабрике PSI свидетельствуют о том, что среднее потребление жидкого гелия при рабочей температуре мишени 32 К, заполненной дейтерием, либо дейтерий-гелиевой смесью, составляет 0,6 л/ч при холодопроизводительности системы охлаждения 0,45 Вт.

Заключение

Созданный экспериментальный комплекс удовлетворяет всей совокупности требований, обусловленных исследованием μCF в дейтерий-гелиевой смеси.

Данный комплекс демонстрирует высокую надежность. Имеется возможность использования двух типов хладагента: в интервале температур 21 - 70 К в качестве хладагента используется жидкий гелий, а в интервале 70 - 300 К - жидкий азот. Уменьшение потребления жидкого гелия для охлаждения криостат-мишени до уровня 0,6 л/ч позволяет в течение месяца проводить эксперименты на пучке мюонов с использованием только лишь одного дьюара объемом 450 л. Это крайне важно при работе с газовой криогенной мишенью. Каждая смена дьюара с хладагентом требует эвакуации содержимого из мишени, что, в свою очередь, не только существенно усложняет процедуру проведения эксперимента, но и приводит к столь нежелательному дополнительному расходу хладагента и дорогостоящего изотопа ^3He . Обеспечена возможность прецизионного измерения температуры основных криогенных узлов криостат-мишени, а также давления газа в мишени и в системе ее газообеспечения.

Следует отметить, что созданный комплекс может быть также успешно использован и для решения целого ряда разнообразных экспериментальных задач в области мюонной и пионной физики.

Авторы глубоко признательны S. Mango и В. van den Brandt за плодотворное обсуждение ряда технических вопросов разработки криостат-мишени и помощь в осуществлении ее испытаний и Р. Knowles за помощь при корректуре рукописи. Авторы выражают благодарность заместителю директора Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований В.Б. Бруданину и руководству Института физики Фрибургского университета (Швейцария) за постоянный интерес и поддержку предложенной программы исследований.

Литература

1. В.Б. Беляев, А. Бертин, В.М. Быстрицкий и др., Сообщение ОИЯИ, Д15-92-323, 1992, Дубна.
2. S.S. Gershtein and V.V. Gusev, *Нур. Inter.*, 82 (1993) 185.
3. Y. Kino and M. Kamimura, *Нур. Inter.*, 82 (1993) 195.
4. V.V. Belyaev, O.I. Kartavtsev, V.I. Kochkin and E.A. Kolganova, *Phys. Rev.*, A52 (1995) 1765.
5. V.V. Belyaev, O.I. Kartavtsev, V.I. Kochkin and E.A. Kolganova, *Z. Phys.*, D41 (1997) 239.
6. V.I. Korobov, *Нур. Inter.*, 101/102 (1996) 333.
7. W. Czaplinski, A. Kravtsov, A. Mikhailiv and N. Popov, *Phys. Lett.*, A219 (1996) 86.
8. V.V. Belyaev, A. Bertin, Vit.M. Bystritsky et al., *Нуклеоника*, 40 (1995) 85.
9. Ф.М. Пеньков, ЯФ, 60 (1997) 1003 [*Phys. Atom. Nucl.*, 60 (1997) 897].
10. R. Jacot-Guillarmod, V.M. Bystritsky et al., PSI Proposal, R-96-01, PSI, 1996.
11. P. Ackerbauer, D.V. Balin et al., PSI Annual Report, Annex 1, PSI, 1996, p. 32.
12. C. Petitjean, D.V. Balin, V.A. Ganzha et al., PSI Proposal, R-94-05.1, PSI, 1997.
13. В.М. Быстрицкий и Ф.М. Пеньков, Препринт ОИЯИ, Е15-97-329, Дубна, 1997.
14. M. Martini and T.A. MacMath, *Nucl. Inst. Meth.*, 79 (1970) 259.
15. В.И. Дацков, Л.В. Петрова и Г.П. Цвинева, Сообщение ОИЯИ, Р8-87-604, Дубна, 1987.
16. В.М. Быстрицкий, В.К. Капышев, С.Ш. Мухамет-Галеева и др., ПТЭ, N 6 (1981) 27.
17. В.М. Быстрицкий, Я. Возняк, А. Гула и др., ПТЭ, N 4 (1984) 46.
18. А.И. Персвезенцев, Б.М. Андреев и И.Л. Селиваненко, *Высокочистые вещества*, N 1 (1990) 122.
19. Б.А. Колачев, В.М. Андреев и И.Л. Селиваненко. *Сплавы - накопители водорода. Справочник*, М., Металлургия, 1994, с.129.
20. К.Н. Зиновьева, Заводская лаборатория, 21 (1955) 30.