

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-2000-29

На правах рукописи
УДК 621.384.664

УСОВ
Юрий Андреевич

**РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК
ДЛЯ МИШЕНЕЙ С ЗАМОРОЖЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ
ЯДЕР ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ**

Специальность: 01.04.01 — техника физического эксперимента,
физика приборов, автоматизация физических исследований

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 2000

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем имени
В.П. Дзелепова Объединенного института ядерных
исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

В.И. Луциков

А.Л. Ерзинкян

Ведущая организация:

Институт физики высоких энергий, г. Протвино

Защита диссертации состоится " " апреля 2000 г. на заседа-
нии диссертационного совета Д.047.01.03 при Лаборатории ядер-
ных проблем Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " _____ 2000 г.

Ученый секретарь совета
доктор физико-математических наук



Ю.А. Батусов

*« ... Волна и камень,
Стихи и проза, лёд и пламень
Не столь различны меж собой. »
А.С. Пушкин*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. Эксперименты с поляризованными мишенями и пучками, занимающие особое место в ядерной физике и физике элементарных частиц, позволяют наиболее прямым способом изучать спиновую зависимость взаимодействий. В этих исследованиях одним из основных инструментов является поляризованная мишень — вещество, в котором спины ядер водорода, дейтерия, лития и т.д. ориентированы в заданном направлении при низких температурах в магнитном поле с использованием динамических методов получения высокой поляризации. Ряд экспериментов, связанных с большими апертурами углов наблюдаемых частиц, может быть поставлен только при использовании мишеней с замороженной поляризацией ядер. Кроме этого, мишени замороженного типа позволяют за счет низкой температуры при выстраивании поляризации получать для ряда веществ предельную поляризацию. Стабильная во времени поляризация замороженных мишеней повышает точность измеряемых в эксперименте величин. Однако создание таких мишеней является чрезвычайно сложной научно-технической задачей, включающей в себя разработку криогенной и измерительной аппаратуры, исследование рабочих веществ для мишеней и т. д. Кроме противоречивых требований, предъявляемых к рефрижератору растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$, т. е. одновременному обеспечению в одном устройстве минимальной температуры и высокой мощности охлаждения, необходимо было создать установки, которые могли бы надежно и эффективно работать в условиях реальных физических экспериментов на ускорителях ОИЯИ, ИФВЭ, ПИЯФ (ЛИЯФ) и Карлова университета (КУ). Решению широкого круга задач, связанных с исследованием и созданием таких установок, посвящена настоящая диссертация.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ состояла в разработке и создании установок сверхнизких температур для мишеней с замороженной поляризацией ядер, используемых в физических экспериментах на ускорителях ОИЯИ, ПИЯФ, ИФВЭ и КУ (Прага).

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ заключается в том, что впервые в нашей стране разработан и применён принципиально новый тип мишеней с замороженной поляризацией ядер водорода и дейтерия.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ заключается в разработке и внедрении мишеней с замороженной поляризацией ядер в физические эксперименты, проводимые на ускорителе ИФВЭ 70 ГэВ, синхротроне и синхротроне ОИЯИ, ускорителе ПИЯФ и ускорителе Ядерного Центра Карлова

университета. На разработанных с непосредственным участием диссертанта мишенях выполнены следующие физические исследования:

1. Цикл экспериментов по измерению коэффициента корреляции поляризаций C_{nn} при энергиях протонов 550–950 МэВ.
2. Цикл работ по экспериментальному исследованию асимметрии образования нейтральных пионов в реакции $\pi^- + p \uparrow \rightarrow \pi^0 + n$ при импульсе 40 ГэВ/с.
3. Исследование азимутальной асимметрии рождения π^0 -мезонов, образующихся в инклюзивной реакции $\pi^- + d \uparrow \rightarrow \pi^0 + X$ с поляризованными дейтронами.
4. Исследование поляризационных явлений в односпиновых pp -взаимодействиях при 70 ГэВ/с.
5. Исследование разности сечений $\Delta\sigma_T$ и $\Delta\sigma_L$ при низких энергиях.
6. Измерение разности полных нейтрон-протонных сечений при значениях кинетической энергии нейтронов 1,20, 2,50 и 3,66 ГэВ.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработка, создание и результаты исследований криогенных систем мишеней с замороженной поляризацией ядер.
2. Предложение и реализация модификации протонной поляризованной мишени в дейтронный вариант.
3. Разработка, создание и результаты исследований мощного рефрижератора растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ для мишени с замороженной поляризацией ядер.
4. Модификация поляризованной замороженной мишени (ANL-Saclay) в "передвижной" вариант и проведение первых экспериментов на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ.
5. Использование разработанных поляризованных замороженных мишеней в физических экспериментах на ускорителях ОИЯИ, ИФВЭ, ПИЯФ и КУ (Прага).

АПРОБАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ. Результаты работ, изложенные в диссертации, докладывались: на научных семинарах Лаборатории ядерных проблем

ОИЯИ и Института физики высоких энергий; на 7-м Международном симпозиуме по поляризационным явлениям в физике высоких энергий (Протвино, 1986); на Международном рабочем совещании по твердотельным мишеням (Бонн, 1990); на Международных симпозиумах по спиновым явлениям при высоких энергиях (Блумингтон, США, 1994, Амстердам, Голландия, 1996 и Протвино, 1998). Результаты работ опубликованы также в Сообщениях и Препринтах ОИЯИ на русском и английском языках и в рецензируемых журналах: ЖЭТФ, ПТЭ, ЯФ, J.Phys. E: Sci. Instrum., Cryogenics, Nucl. Instr. & Meth., Z. Phys.

Расположение материала. Диссертация изложена на 95 страницах и состоит из шести глав и заключения; содержит 27 рисунков и 10 таблиц. Список литературы составляет 89 пунктов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Н.С. Борисов, Э.И. Бунятова, Ю.Ф. Киселев, В.Н. Матафонов, Б.С. Неганов, Ю.А. Усов, "Протонная поляризованная "замороженная" мишень", *Сообщения ОИЯИ* 13-10253, 13-10257, Дубна, 1976.
2. Н.С. Борисов, Э.И. Бунятова, А.Г. Володин, М.Ю. Либург, В.Н. Матафонов, А.Б. Неганов, Б.С. Неганов, Ю.А. Усов, "Поляризованная протонная "замороженная" мишень для вторичных пучков частиц высокой энергии", *Сообщения ОИЯИ* 1-80-90, Дубна, 1980.
3. N.S. Borisov, E.I. Bunyatova, M.Yu. Liburg, V.N. Matafonov, A.B. Neganov, Yu.A. Usov, "Frozen spin polarized deuteron target 60 cm³ in volume", *J.Phys. E: Sci. Instrum.* **21** (1988); *Препринт ОИЯИ* P1-85-292, Дубна, 1985.
4. Н.С. Борисов, Э.И. Бунятова, М.Ю. Либург, В.Н. Матафонов, А.Б. Неганов, Ю.А. Усов, "Динамическая поляризация ядер дейтерия в полностью дейтерированных этандиоле и пропандиоле", *Препринт ОИЯИ* P13-84-430, Дубна, 1984; *ЖЭТФ* **87** (1984) 2234.
5. N.A. Bazhanov, E. Boschitz, B. Brinkmoller, V.A. Efimovych, O.Ya. Fedorov, S.I. Kalentaroza, A.I. Kovalev, . . . , Yu.A. Usov, M. Weßler, "Vector analysing power iT_{11} in the $\pi d \rightarrow pp$ reaction in the energy region $T_{\pi} = 350 \div 450$ MeV", *Phys. Rev. C* **47** (1993) 395.
6. И.А. Аввакумов, . . . , Ю.А.Усов, Б.А.Хачатуров, "Поляризация в реакции перезарядки $\pi^{-} + p \rightarrow \pi^{0} + n$ в области малых передач импульса при 40 ГэВ/с", ИФВЭ, 80-94, 1980.

7. J. Ball, . . . , Yu.A.Usov, "Proton and neutron polarized targets for nucleon-nucleon experiments at SATURNE-2", *Nucl. Instr. & Meth. A* **327** (1996) 4.
8. N.S. Borisov, V.N. Matafonov, A.B. Neganov, Yu.A. Plis, O.N. Schevelev, Yu.A. Usov, I. Jánský, M. Rotter, B. Sedlak, I. Wilhelm, G.M. Gurevich, A.A. Lukhanin, J. Jelínek, A. Srnka, L. Skrebek, "Target with a frozen nuclear polarization for experiments at low energies", *Nucl. Instr. & Meth. A* **345** (1994) 421; in *Proc. of the 11th Int. Symposium on High Energy Spin Physics*, Bloomington, 1994, p.545.
9. N.A. Bazhanov, . . . , Yu.A. Usov, "A movable polarized target for high energy spin physics experiments", *Nucl. Instr. & Meth. A* **372** (1996) 349; F. Lehar, . . . , Yu.A.Usov et al., *Nucl. Instr. & Meth. A* **356** (1995) 58; N.A.Bazanov, . . . , Yu.A.Usov, "Frozen spin solid targets developed at the Laboratory of Nuclear Problems (JINR, Dubna)", *Nucl. Instr. & Meth. A* **402** (1998) 484.
10. J. Brož, . . . , Yu.A. Usov et al., *Z. Phys. A* **354** (1996) 401; J. Brož, . . . , Yu.A. Usov et al., *Z. Phys. A* **359** (1997) 23.
11. N.S. Borisov, V.V. Kulikov, A.B. Neganov, Yu.A. Usov, "A powerful ^3He - ^4He dilution refrigerator for a frozen spin target", *Cryogenics* **33**, No.7 (1993) 738; in *Proc. of the 11th Int. Symposium on High Energy Spin Physics*, Bloomington, 1994, p.545.

Цитированная литература.

12. T.O. Niinikoski and F. Udo, *Nucl.Instr. & Meth.* 134 (1976) 219.
13. Б.С. Неганов, Н.С. Борисов, М.Ю. Либург, "Метод получения сверхнизких температур, основанный на растворении ^3He в ^4He ", *Препринт ОИЯИ* Р-2480, 1965; *ЖЭТФ* **50** (1966) 1445.
14. Б.С. Неганов, "Получение сверхнизких температур и создание протонных и дейтронных поляризованных мишеней", в *Трудах Международной конференции по электромагнитным взаимодействиям при низких и средних энергиях*, Дубна, т.4, 1967 p.300.
15. T.J. Schmutge, C.D. Jeffries, *Phys.Rev.* **138** (1965) 1785.
16. Н.С. Борисов и др., *Сообщения ОИЯИ* Р6-7408, 1973.

17. Э.И. Бунятова, *Автореферат кандидатской диссертации*, ОИЯИ, Дубна, 1–89–75, 1989;
М.Ю. Либург, *Автореферат кандидатской диссертации*, ОИЯИ, Дубна, 13–92–583, 1992.
18. О.В. Лоунасмаа, *Принципы и методы получения температур ниже 1 К*, М., Мир, 1977.
19. Н.С. Борисов, *Автореферат кандидатской диссертации*, ОИЯИ, Дубна, 2000.
20. Т.О. Niinikoski, "Large-scale applications of dilution refrigerators", CERN–EP/83–127, 1983.
21. M. Borghini, *Phys. Rev. Letters* **20** (1968) 419;
A. Abragam, *Principles of nuclear magnetism*, Oxford Univ. Press, London, 1961.
22. P.Roubeau, *Cryogenics* August 1966, p. 207.
23. Л.Б. Парфенов, Б.С. Неганов, *Препринт ОИЯИ* 13–4143, Дубна, 1968;
D. Draghicescu, V.I. Lushchikov, V.G. Nikolenko, Yu.V. Taran, F.L. Shapiro, *Phys. Letters* **12** (1964) 334.
24. Yu.F. Kisselev et. al., *Nucl. Instr. & Meth.* **220** (1984) 399.
25. В.Д. Апокин, . . . , Ю.А. Усов и др., "Первые результаты по измерению азимутальной асимметрии рождения π -мезонов в области фрагментации пучка на поляризованных дейтронах", ИФВЭ, 88–79, Серпухов, 1988.
26. J.Ball et al., "Improvements of the polarized target for nucleon–nucleon experiments at SATURNE–2", in *Proceedings of the 4th Int. Workshop on Polarized Target Materials and Techniques*, Bonn, 1984, p.112.
J.Ball, . . . , Yu.A.Usov, *Nucl. Instr. & Meth.* **A 327** (1993) 308.
27. С.Е. Allgower, . . . , Yu.A. Usov et al., *Eur. Phys. J* **C5** (1998) 453.
28. В.Р. Adiasovich, . . . , Yu.A. Usov et. al., *Z. Phys.* **C 71** (1996) 65.
29. R.A. Arndt et al., *Phys.Rev.* **C 56** (1997) 3005.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ (Введение) кратко описаны основные особенности и преимущества поляризованных мишеней замороженного типа.

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ изложены физические основы метода получения сверхнизких температур путём растворения жидкого ^3He в сверхтекучем ^4He и применение его в экспериментальной физике. Принцип процесса охлаждения аналогичен методу получения низких температур, основанному на испарении низкотемпературных жидкостей. Как и этот классический метод, он основан на использовании скрытой теплоты перехода "жидкость-пар", поскольку процесс растворения ^3He в соответствии с теоретическими моделями, описывающими свойства растворов, можно трактовать как превращение ферми-жидкости в ферми-газ.

Для реализации непрерывного процесса растворения ^3He в ^4He необходимо постоянно нарушать равновесие концентрированной и разбавленной фаз путём постоянного удаления атомов ^3He из паровой фазы системой циркуляции рефрижератора. В результате нарушения таким путём равновесия фаз, стимулируются новые переходы, как в обычном "испарительном" способе охлаждения, реализующемся посредством непрерывной откачки паровой фазы над кипящей жидкостью. Если растворять ^3He в ^4He в адиабатических условиях, то этот процесс будет сопровождаться понижением температуры. Этот метод, впервые успешно реализованный Б.С. Негановым, Н.С. Борисовым и М.Ю. Либургом [13], удачно сочетающий большую мощность охлаждения с возможностью достижения предельно низких температур (до 0,002 К), как нельзя лучше подходит для создания замороженных поляризованных мишеней.

Метод получения сверхнизких температур путем растворения ^3He в ^4He по сравнению с другими методами обладает рядом преимуществ. Эти преимущества заключаются в значительной холодопроизводительности при сверхнизких температурах, в возможности стабилизации температуры в течение многих часов и даже дней, в возможности регулирования температуры. При этом, исследуемый образец можно охладить непосредственно жидким гелием без применения специальных хладопроводов. Все эти преимущества значительно расширяют возможности различных исследований при температурах порядка сотых и тысячных Кельвина вблизи абсолютного нуля. Данные характеристики обусловили широкое применение этого способа охлаждения в экспериментальной физике.

Наиболее широко установки, использующие метод растворения ^3He в ^4He , применяются в лабораторных исследованиях. Обычно для этих целей используются рефрижераторы различных модификаций, изготовленные фирмами SHE (Superconductivity Helium Electronics), Lake Shore — США, Oxford Instruments Limited — Англия или собственные разработки исследовательских групп. Как правило, это — миниатюрные установки с высокой степенью автоматизации

и коротким временем выхода на рабочие параметры. Иногда в лабораторных установках рефрижераторы растворения являются только ступенью предохлаждения для ядерного размагничивания, в таких установках удается получить температуры ниже 10^{-4} К. В настоящей работе излагаются результаты развития и применения техники сверхнизких температур, основанной на использовании эффекта охлаждения при растворении жидкого ${}^3\text{He}$ в сверхтекучем ${}^4\text{He}$, для создания мишеней с замороженной поляризацией ядер. Приведены основные термодинамические соотношения процесса растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$, сравнение характеристик рефрижераторов растворения и рефрижераторов испарения ${}^3\text{He}$.

Первая мишень такого типа была создана в CERN [12] и несколько позже, независимо, в ЛЯП ОИЯИ [1]. К настоящему времени создано более десяти мишеней подобного типа.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ дается краткий обзор мишеней с замороженной поляризацией ядер водорода и дейтерия, а также основные принципы и параметры, необходимые для создания установок подобного типа.

В 1966 году, после стационарного получения сверхнизких температур при помощи принципиально нового метода охлаждения, основанного на растворении ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ [13], у Б.С. Неганова [14] и, независимо, у Т.Т. Schmugge и С.Д. Jeffries [15] возникла идея создания поляризованных мишеней "замороженного типа" — мишеней второго поколения. Такие мишени позволяют использовать магнитные системы с изменяющейся апертурой, где динамическая накачка производится, как и в мишенях первого поколения, характеризующихся непрерывным выстраиванием поляризации, в магнитной системе с малой апертурой в сильном однородном поле. Экспозиция на пучке частиц высоких энергий, в таком случае, может производиться в слабом и значительно менее однородном поле и практически неизменной поляризацией, если температура вещества мишени после прекращения накачки может быть быстро понижена до $T \leq 0,05$ К. Такая возможность открывается лишь при использовании в качестве охлаждающей системы специальных мощных рефрижераторов растворения ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$. Мишени такого типа весьма удобны в эксплуатации, но могут быть использованы при ограниченных интенсивностях пучков. Для мишеней замороженного типа в мировой литературе предельная интенсивность пучков релятивистских заряженных частиц определена как 10^8 частиц/с. При превышении этой величины температуру вещества мишени определяет всё в большей степени интенсивность пучка, а не температура раствора ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$, что обусловлено сопротивлением Капицы на границе жидкость — твёрдое тело. Поэтому, для больших интенсивностей используемых пучков рефрижераторы растворения создаются в упрощенном варианте и минимальная температура в таких мишенях составляет около 0,05 К. Таким образом, проигрывая в минимальной температуре и, соответственно, резко во времени релаксации, на этих установках появляется возможность работать с высокоинтенсивными пучками и поляризовать большие объемы вещества. Установки для получения мишеней с высокой поляризацией

ядер довольно сложны и для их создания требуется проведение серьезных работ и исследований в области физики и техники сверхнизких температур [16], магнитных систем, устройств для измерения и накачки поляризации ядер, совершенствования рабочих веществ поляризованных мишеней [17] и др.

В настоящей работе, в большей степени, освещены вопросы, имеющие непосредственное отношение к получению и использованию сверхнизких температур в установках этого типа. Главное требование, предъявляемое к рефрижераторам растворения ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ в поляризованных мишенях замороженного типа — оптимально совместить получение большой мощности охлаждения и предельно низкой температуры в одном устройстве. Кроме этого, особыми условиями являются также высокая надежность всех систем установки, необходимая для работы на выведенных пучках частиц в течение длительного времени, и возможность дистанционного контроля и управления основными системами установки. Еще одним характерным требованием к конструкции рефрижераторов растворения ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$, используемых в поляризованных мишенях, является необходимость загрузки рабочего вещества в "холодном" (80 К) состоянии, что вызвано низкой температурой плавления используемых материалов: пентанола, пропандиола, аммиака и т.д. Ниже приводятся исходные параметры и зависимости, которые необходимо учитывать при создании установок этого типа. Рассматривая проблему совмещения в одном устройстве большой мощности охлаждения и предельно низкой температуры, исходим из соотношения [18]:

$$\dot{Q}_M = \dot{n}_3(96 \times T_M^2 - 12 \times T_N^2), \quad (1)$$

где Q_M – внешний теплоприток к ванне растворения,

n_3 – молярная скорость циркуляции ${}^3\text{He}$,

T_M – температура раствора в ванне растворения,

T_N – температура ${}^3\text{He}$ на выходе из последнего теплообменника.

Если принять удельную мощность, необходимую для охлаждения вещества мишени в режиме динамической накачки поляризации за 1 мВт/г, а температуру, при которой происходит этот процесс – 0,3 К, то необходимую циркуляцию ${}^3\text{He}$ на один грамм вещества мишени можно оценить как:

$$\dot{n}_3 = 0,13 \text{ моль/г} \cdot \text{с}. \quad (2)$$

Получение высокой холодопроизводительности обусловлено не только мощностью используемых для циркуляции ${}^3\text{He}$ насосов, но и, в большой степени, оптимальным сечением каналов противоточных теплообменников. Наиболее подробные расчеты систем низкотемпературных теплообменников для мощных рефрижераторов растворения были проведены Н.С. Борисовым и Т.О. Niinikoski [19,20]. Применение одной из этих методик расчетов для конкретного случая создания мощного рефрижератора растворения ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ приводится в Главе 5.

Затем, кратко рассмотрены процессы, на которых основаны методы получения и измерения высокой поляризации ядер, а также способ получения поляризации методом "ГРУБОЙ СИЛЫ".

Применяющийся для получения высокой поляризации лёгких ядер (протонов, дейтронов и т. д.) метод динамической поляризации ядер (ДПЯ) сводится к следующему. В подходящем материале твердотельной мишени с высокой концентрацией атомов Н или D создаются химическим способом или облучением парамагнитные центры, содержащие неспаренные электроны. Так как магнитный момент у электрона много больше чем у нуклона то, к примеру, при $B = 2,5$ Т и $T = 0,5$ К равновесная электронная поляризация очень высока (99%), а протонная, в тех же условиях, составляет менее 0,5%. Таким образом, суть ДПЯ состоит в передаче ядрам высокой поляризации электронов с помощью СВЧ-облучения рабочего вещества мишени. При этом устанавливается динамическое равновесие, определяемое соотношением времён спин-решёточной релаксации электронной и ядерной систем. Благодаря тому, что время релаксации системы ядерных спинов значительно больше, чем время релаксации электронных спинов, методом ДПЯ удается получить высокую поляризацию ядер. В процессе динамической поляризации происходит поглощение мощности СВЧ, удельная величина которой зависит от типа мишени и применяемого вещества. В поляризованных мишенях с большим количеством рабочего вещества, где используются мощные источники СВЧ, возникает проблема равномерного охлаждения по всему объёму, что накладывает ряд специфических требований к конструкции рефрижератора растворения $^3\text{He}-^4\text{He}$.

Следующим определяющим параметром любой мишени с замороженной поляризацией ядер является время спин-решеточной релаксации в режиме экспозиции, которое зависит от температуры, величины удерживающего магнитного поля, типа рабочего вещества мишени, интенсивности пучка частиц и т. д. Именно эта зависимость, для любых условий эксперимента и применяемого рабочего вещества, стимулирует и оправдывает усилия по понижению минимальной температуры в поляризованных мишенях замороженного типа. Соотношение начальной P_0 и конечной P_t поляризации на момент времени t определяется выражением [21]:

$$P_t = P_0 \cdot e^{-t/\tau}, \quad (3)$$

где τ — время спин-решеточной релаксации ядерных спинов в веществе мишени в данных условиях.

В Таблице 1 приводятся основные параметры наиболее известных мишеней замороженного типа, созданных к настоящему времени: (CERN, PSI, Saclay, Bonn и др.). Дается сравнение двух принципов охлаждения криостатов мишеней — ”стационарного” и ”проточного”.

Далее, кратко излагаются результаты работ по модификации в ”передвижной” вариант поляризованной мишени, созданной сотрудниками Сакле и Аргона для экспериментов в Лаборатории им. Э. Ферми. Хотя эта поляризованная мишень использовалась в эксперименте E-704, авторам, в силу ряда обстоятельств, так и не удалось достичь оптимальных параметров. Следует отметить что по объёму рабочего вещества и холодопроизводительности эта установка является одной из самых крупных в мире. В рамках проекта проведения по-

Таблица 1:

Иссл. центр	Магн. поле (T)	Вещество мишени	Объем мишени (см^3)	Макс. поляр. (%)	T_{min} (мК)
TRIUMF (Canada)	2.5/0.257	Бутанол	55	80	60
Saclay (France)	2.5/0.4	Пентанол	70	85	40
Wonn	5.0/0.35	Бутанол	30	98	50
КЕК (Kyoto)	2.5	Пропандиол	30	85	20
CERN	2.5/1.0	Пропандиол	30	90	
EMC	2.5/0.5	Аммиак	2×2000	75–80	30
SMC	2.5/0.5	Бутанол, ${}^6\text{LiD(H)}$	2×800	94	
Дубна, ИФВЭ	2.08/0.45	Пропандиол Пропандиол	60	94 (p) 40 (d)	15
Дубна, ПИЯФ	2,7/2,7	Пропандиол	15	98	35
Дубна, Прага	2,7/0,37	Пропандиол	20	95	20
ХФТИ (Харьков)	2.7	Пропандиол NH_3 , ND_3	8 8	85 75 (p), 37 (d)	< 50
FNAL (Batavia)	6.5	Пентанол	140	80–90	≤ 50
PSI (Villigen)	2.5		100	60–80	< 50

ляризации исследований на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ, эта поляризованная мишень была перевезена в Дубну и силами специалистов из ДУБНЫ, САКЛЕ, ПИЯФ, ИЯИ РАН и ХФТИ была модифицирована в специальный передвижной вариант.

Следует отметить, что мишени, созданные в ЛЯП ОИЯИ, выделяются низкой предельной температурой, а значит, при прочих равных условиях, и большим временем релаксации, т.е. сохранения поляризации. Это следствие не только богатых традиций ЛЯП ОИЯИ в области физики и техники сверхнизких температур, но и того обстоятельства, что все эти мишени предназначались к использованию на пучках с интенсивностью, не превышающей нескольких единиц на 10^6 частиц/с. Другой характерной особенностью поляризованных мишеней, созданных в ЛЯП ОИЯИ, является стационарный вариант криостатов мишеней с использованием значительных гелиевых и азотных ёмкостей. Криостаты такой конструкции могут функционировать без сложных автоматических систем регулирования криогенных потоков, непрерывной откачки вакуумных объемов и т.д. С другой стороны, криостаты такого типа за счет более сложной и оптимальной конструкции низкотемпературных узлов позволяют достичь предельных параметров. Стационарные криостаты характерны небольшим расходом жидкого гелия, что обусловлено как применением жидкого азота для предварительного охлаждения, так и более эффективным использованием собственно жидкого гелия.

Криостаты другого типа, которые условно можно назвать "проточными", основаны на принципах, заложенных Roubeau [22]. Основным преимуществом криостатов типа Roubeau, по сравнению со стационарными, является более короткое время достижения рабочих параметров за счёт значительного усложнения всей системы и особенно вследствие необходимости автоматизации регулирования потоков ^4He . В криостатах этого типа охлаждение и поддержание рабочих режимов осуществляется за счёт регулирования потоков гелия и основных процессов установки, что требует совершенных систем автоматизации и контроля. Жидкий азот для предварительного охлаждения в этом случае не используется. Расход жидкого гелия в таких криостатах значительно выше, но время достижения рабочих параметров существенно короче. Кроме этих особенностей — "проточные" криостаты, за счет высокой автоматизации большинства процессов, могут обслуживаться меньшим количеством персонала. Контроль и управление режимами работы криостатов такого типа можно осуществлять с помощью персональных компьютеров.

Сравнение этих двух концепций создания как криостатов, так и поляризованных мишеней в целом, приводит к мысли о возможности совмещения в одном устройстве наиболее удачных технических решений при создании основных элементов установки. Это позволило бы, не утратив высокого уровня основных параметров, резко упростить эксплуатацию и повысить надёжность поляризованной мишени в целом, как физического прибора, предназначенного к использованию в реальных условиях физического эксперимента.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ описываются устройства и основные параметры созданных в ЛЯП ОИЯИ мишеней с замороженной поляризацией ядер. Как уже было сказано выше, впервые мишень замороженного типа была создана в CERN и несколько позже, независимо, в ЛЯП ОИЯИ [1]. Таким образом, в этой ситуации большинство вопросов, которые возникли во время создания этой установки, были принципиальными и новыми. Тем не менее, большой опыт создания лабораторных рефрижераторов растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$, поляризованных протонных мишеней динамического типа [23], а также поисковые работы по исследованию оптимальных веществ для мишеней [16] были хорошей основой при создании мишени принципиально нового типа. В настоящей работе в большей степени будет описана криогенная часть установок — поляризованных мишеней замороженного типа, созданных в ЛЯП ОИЯИ.

Основой рефрижератора растворения ПЕРВОЙ, из созданных в ЛЯП ОИЯИ, поляризованной мишени является гелиевый криостат сверхпроводящего магнита фирмы Oxford Instruments Limited. Этот криостат служит для охлаждения катушек сверхпроводящего магнита в геометрии Гельмгольца и для обеспечения работы ступени растворения. Наиболее отличительной особенностью этой мишени является наличие прямого доступа в ванну растворения, что позволяет, используя шлюзовые устройства, менять вещество мишени даже в режиме работы рефрижератора растворения. На Рис. 1 показана зависимость холодопроизводительности рефрижератора растворения от температуры при двух значениях циркуляции ${}^3\text{He}$. Крестиками выделены измеренные нами значения, которые хорошо согласуются с расчетными значениями, обозначенными сплошными линиями. Эта особенность позволяет использовать данную установку также и как исследовательскую. В своё время эта мишень рассматривалась лишь как прототип для изучения возможностей криогенной аппаратуры в условиях реального эксперимента на ускорителе и исследования различных характеристик самой "замороженной" мишени и использования этого опыта впоследствии при проектировании мишени большого объёма. Но конструкция первой мишени оказалась настолько удачной и надёжной, что до сих пор (т. е. уже более 20 лет) эта установка успешно используется в ПИЯФ.

В 1978 году в Лаборатории ядерных проблем были завершены работы по созданию (Большой) поляризованной протонной замороженной мишени объемом 60 см^3 [2], которая в настоящее время используется на ускорителе в ИФВЭ. Основной отличительной особенностью этой мишени является применение компактного электромагнита с раздвигающимися полюсами, что обеспечивает в сдвинутом состоянии высокую однородность (не хуже 10^{-4}) магнитного поля в объёме образца мишени при поле 2,1 Т, и горизонтального гелиевого криостата. Выбор такой компоновки установки был обусловлен тем, что оптимальное количество вещества по пучку частиц (согласно расчетам наших коллег из ИФВЭ) составляло примерно 8 г/см^2 . Кроме этого, изготовление симметричного горизонтального криостата представлялось нам значительно более технологически простой задачей, а загрузка вещества мишени также упрощалась. К этому

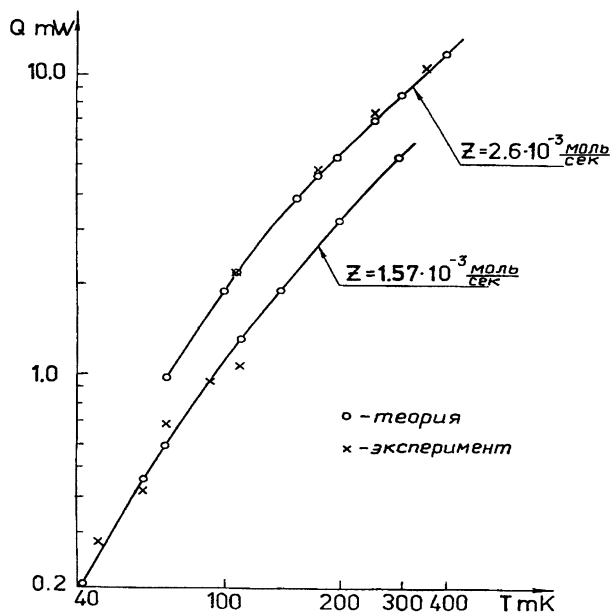


Рис. 1: Зависимость холодопроизводительности рефрижератора от температуры при двух значениях циркуляции ^3He .

времени уже были известны горизонтальные криостаты конструкции Rubeau и нашей задачей было создать более экономичный и, что более важно в данном случае, более низкотемпературный мощный рефрижератор для этой мишени. Принятая схема установки доказала свою высокую надёжность, что очень важно при проведении длительных (до 30 суток) сеансов на пучках в ИФВЭ. Время охлаждения установки от комнатной до азотной температуры составляет около шести часов, а от азотной до гелиевой — около четырёх часов. Необходимо подчеркнуть, что вторая из созданных в ЛЯП ОИЯИ замороженных поляризованных мишеней оказалась сразу по целому ряду важнейших параметров более оптимальной: сказался приобретённый опыт и более глубокое понимание всех факторов, влияющих на оптимизацию работы установки.

Интерес экспериментаторов к поляризованным ядрам дейтерия стимулировал работу по созданию дейтронных поляризованных мишеней. Эта работа проводилась на действующих установках с 1981 года по предложению автора в ИФВЭ [3,4] и, независимо, другой группой в ПИЯФ [24]. Результатом этих работ стала реализация на этих установках и дейтронного варианта, таким образом, в настоящее время эти мишени могут использоваться как в протонном, так и в дейтронном вариантах, что позволяет значительно расширить круг изучаемых проблем. Хотя основной задачей при реализации дейтронного ва-

рианта поляризованной мишени является создание аппаратуры для измерения поляризации дейтронов, а также работы по синтезированию новых (дейтерированных) веществ мишени, была проведена большая работа по оптимизации основных параметров рефрижератора. Это было вызвано тем, что изначально предполагалась необходимость большей холодопроизводительности рефрижератора и максимального понижения достижимой температуры. В результате усовершенствования камеры растворения, замены блока низкотемпературных теплообменников и ванны испарения мощность охлаждения в режиме динамической накачки поляризации была увеличена более чем в полтора раза. В новой камере растворения был применен принципиально новый метод подачи ^3He "снизу" — через рассеиватель. Такой способ, в отличие от традиционного с фиксированной границей двух фаз, позволяет получить за счет "объемного" растворения ^3He в слабоконцентрированной фазе более равномерное охлаждение рабочего вещества мишени. Это обстоятельство особенно важно при работе мощных рефрижераторов растворения. Модификация этих мишеней в дейтронный вариант позволила выполнить в ИФВЭ и ПИЯФ ряд интересных экспериментальных работ [5,6,25].

Поляризованная мишень с материалом ^6LiD , имеющим одинаковое количество протонов и нейтронов, является наилучшей для изучения рассеяния на поляризованных нейтронах, притом что энергии связи ^6Li и D сравнимы по величине и малы. Известно, что ^6LiD можно рассматривать как слабо связанную систему ($^4\text{He}+\text{D}$). Сам дейтрон может с разумной точностью описываться как нейтрон и протон с параллельными спинами. По этой причине материал ^6LiD содержит половину поляризуемых нуклонов. Все вышеуказанные факторы и являются причиной, по которой вещество ^6LiD было выбрано в Сакле в качестве рабочего вещества мишени. В 1992–1995 гг. в сотрудничестве специалистов из Франции, США, Чешской Республики, ОИЯИ и Украины были проведены исследования ^6LiD [7,26]. Для того, чтобы стать поляризуемыми, соединения ^6Li облучались в Сакле электронным пучком с энергией 2,3 МэВ для образования "центров окраски" (F-центров), которые действуют точно так же как химически добавленные парамагнитные центры в спиртах.

В качестве примера на Рис.2 показан рост поляризации во времени для трех

Таблица 2:

Образец	Электронная экспозиция (см^{-2})	Поляризация спустя 1 час	Поляризация спустя 7 часов	Ядерная релаксация (дни)
1	3×10^{17}	30%	42%	29
2	1×10^{17}	22%	40%	66
3	3×10^{16}	7%	30%	70

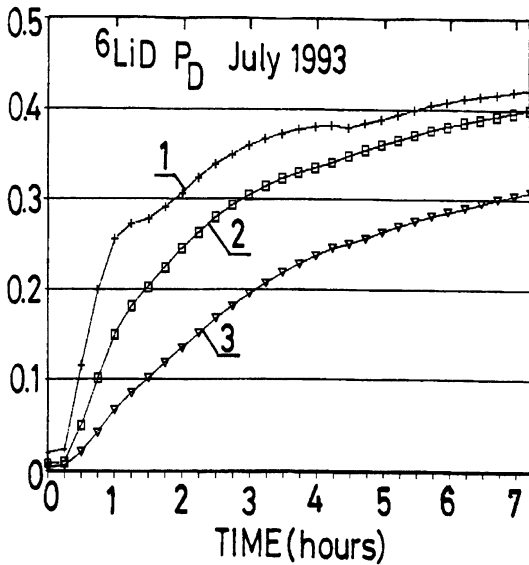


Рис. 2: Выстраивание поляризации дейтронов в ${}^6\text{LiD}$ для трех образцов, облученных различными электронными экспозициями (см. Таблицу 2).

образцов ${}^6\text{LiD}$, облученных при одинаковой температуре (185 K), но с различными электронными экспозициями. Поляризирующее поле составляло 2,5 Т. Полученные результаты суммируются в Таблице 2, ядерная релаксация измерялась по изменению величины поляризации образцов за 20 часов при удерживающем поле 0,33 Т и температуре 50 мК.

Результаты указанных методических работ позволили провести на SATURNE-II серию экспериментов по упругому и квазиупругому pp и pn рассеянию с мишенью ${}^6\text{LiD}$ [27], а дополнительные измерения с мишенью ${}^6\text{LiH}$ позволили выделить эффекты поляризации ${}^6\text{Li}$ и дейтронов.

Кроме уже рассмотренных двух установок, как уже говорилось выше, была также создана замороженная поляризованная мишень для экспериментов при низких энергиях [8], которая в настоящее время успешно используется в Праге для исследования поляризационных параметров в np -рассеянии. Главная особенность этой установки — большая апертура для измерения вторичных частиц, что обеспечивается использованием в замороженном режиме сверхпроводящего диполя. Диполь создает удерживающее поле $B = 0,37$ Т при апертуре почти 360° и 50° в горизонтальной и вертикальной плоскостях, соответственно. В режиме динамической накачки поляризации используется сверхпроводящий соленоид, обеспечивающий при $B = 2,7$ Т однородность магнитного поля не

хуже 10^{-4} в объёме вещества мишени. Вертикальный криостат рефрижератора растворения ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ позволяет охлаждать рабочее вещество мишени до 20 мК в замороженном режиме и отводить $30 \div 40$ мВт при температуре 0,3 К в режиме динамической накачки поляризации. Поляризующий соленоид после завершения процесса динамической накачки поляризации может при необходимости перемещаться на расстояние более метра и, таким образом, освобождать пространство для размещения аппаратуры, регистрирующей вторичные частицы. Использование пучка поляризованных нейтронов для проведения экспериментов на этой мишени обусловило высокие требования к радиационной безопасности, что резко ограничило доступ к установке во время проведения физических экспериментов. Этим обстоятельством вызвано также и удаленное расположение дистанционного пульта управления мишени. Этот пульт служит для управления внешними цепями системы циркуляции ${}^3\text{He}$. На этом же пульте расположены также и приборы контроля основных элементов мишени. Магнитная система мишени позволяет получать как продольное, так и поперечное направления поляризации, что значительно расширяет возможности экспериментальной установки в целом.

Представлены также результаты модификации поляризованной мишени [9], ранее использовавшейся в экспериментах в лаборатории им. Э.Ферми. Основной задачей, в данном случае, было не только собрать и запустить установку из отдельно поступивших к нам узлов, но и модифицировать мишень в "передвижной" вариант. Этим словом подчеркивается достижение принципиально нового качества установки по сравнению с другими. Авторами проекта ставилась задача сократить время на подготовку установки к работе на любом другом ускорителе. Эта задача была решена за счет компоновки установки в виде отдельных блоков, не превышающих размеры стандартного морского контейнера. Таким образом, установка в случае необходимости разбирается на блоки, помещается в морской контейнер, перевозится и монтируется на новом месте в очень сжатые сроки. Для реализации этого принципа компоновка установки была сильно изменена. Более того, пришлось срочно создавать ряд узлов мишени, которые по разным причинам не были получены из Франции и США: системы циркуляции и очистки ${}^3\text{He}$, СВЧ-систему и некоторые другие. Таким образом, в сжатые сроки были завершены не только работы по модификации мишени и испытаниям, но и проведены первые экспериментальные работы [28]. На Рис. 3 показан общий вид установки, установленной на нейтронном пучке синхрофазотрона ЛВЭ.

В Таблице 3 приводится сводная информация по созданным при активном участии автора настоящей работы экспериментальным установкам.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ описываются результаты работ по созданию мощного рефрижератора растворения [11], предназначенного для поляризованной мишени с замороженной поляризацией ядер.

Описана конструкция и даётся расчёт, предложенный в [19], основного низкотемпературного теплообменника рефрижератора растворения ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$. Основ-

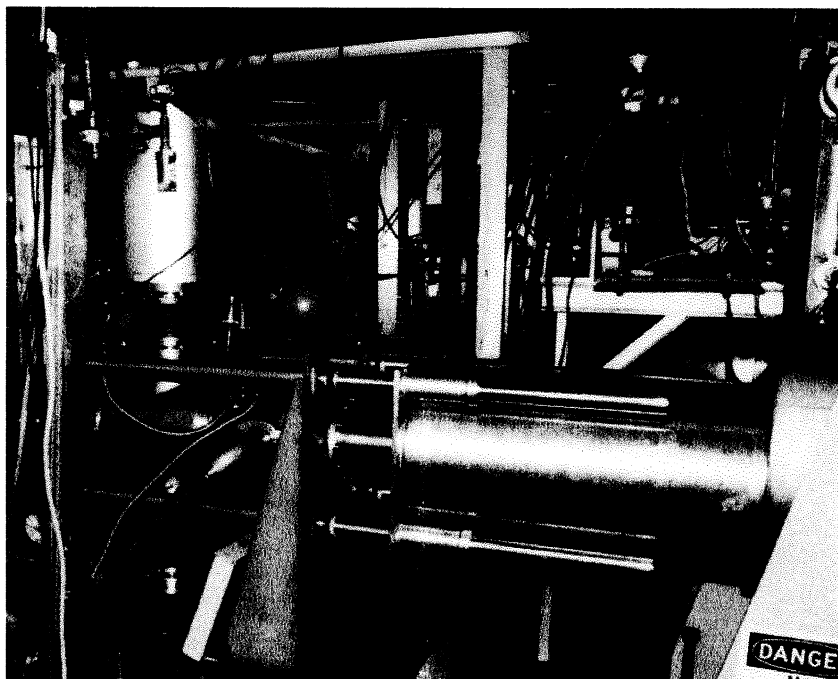


Рис. 3: Общий вид установки "Передвижная поляризованная мишень".

Таблица 3:

Год первой публикации	Объем мишени (см ³)	Вещество мишени	Максим. поляриз. (%)	Магнитное поле B (Т), дин./замор.	Ускоритель (место)	Авторы публикаций
1976	15	$C_3H_6(OH)_2$ 1,2-пропандиол с $Cr(V)$ ($1,8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$)	$P_{\pm} = (98 \pm 2)\%$	2,69/2,69	Дубна, ПИЯФ	Н.С. Борисов, Э.И. Бунятова, Ю.Ф. Киселев, В.Н. Матафонов, Б.С. Неганов, Ю.А. Усов [1]
1980	60	$C_3H_6(OH)_2$ 1,2-пропандиол с $Cr(V)$ ($1,8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$)	$P_{\pm} = (87 \pm 3)\%$	2,06/0,45	ИФВЭ	Н.С. Борисов, Э.И. Бунятова, А.Г. Володин, М.Ю. Либург, В.Н. Матафонов, А.Б. Неганов, Б.С. Неганов, Ю.А. Усов [2]
1985	60	$(CD_2OD)_2$ дейтерированный этандиол с $Cr(V)$	$P_{\pm} = (37 \pm 3)\%$	2,06/0,45	ИФВЭ	Н.С. Борисов, Э.И. Бунятова, М.Ю. Либург, В.Н. Матафонов, А.Б. Неганов, Ю.А. Усов [3,4]
		$C_3D_6(OD)_2$ дейтерированный пропандиол с $Cr(V)$	$P_{\pm} = (40 \pm 3)\%$	2,06/0,45	ИФВЭ	
1992	120	Создан рефрижератор растворения 3He - 4He (ОИ-ЯИ) и магнит (ИФВЭ)		2,5	ИФВЭ (проект)	Н.С. Борисов, В.В. Куликов, А.Б. Неганов, Ю.А. Усов [11]
1994	20	$C_3H_6(OH)_2$ 1,2-пропандиол с $Cr(V)$ ($1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$)	$P_+ = (93 \pm 3)\%$, $P_- = (98 \pm 2)\%$	2,7/0,37	Прага	Н.С. Борисов и др. [8]

ной целью такого расчёта является определение минимально достижимой температуры T_{Mmin} в предлагаемой конструкции рефрижератора. Для упрощения расчётов принят ряд допущений, существенным образом не влияющих на конечный результат расчётов:

1. Пренебрегаем теплосоппротивлением мельхиоровой стенки теплообменника;
2. Пренебрегаем теплоотдачей в канал, т. е. учитываем только теплосоппротивление, обусловленное "сопротивлением Капицы";
3. Пренебрегаем небольшим различием поверхностей теплообмена со стороны раствора и ^3He ;
4. Пренебрегаем теплосоппротивлением слоя медного порошка и слоя жидкости по сравнению с "сопротивлением Капицы";
5. Исходя из того, что весь теплообменник представляет собой сорок четыре хорошо изолированные между собой секции, такое устройство можно считать непрерывным теплообменником и применять соответствующие методы расчёта.

Термин "сопротивление Капицы" употребляется для обозначения теплового сопротивления, возникающего на границе между жидким гелием и твердым телом. Тепловое граничное сопротивление Капицы (R_k) определяется следующим выражением:

$$R_k = \Delta T / \dot{Q}, \quad (4)$$

где ΔT — перепад температур на границе раздела жидкость–твердое тело; \dot{Q} — скорость теплового потока через границу раздела.

Для коэффициента сопротивления Капицы $\alpha = R_k \cdot T^3$ необходимые данные взяты из монографии О.В. Лоунасмая [18]:

для раствора — $\alpha_M = (0,02 \div 0,03) \text{ K}^4 \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$,

для ^3He — $\alpha_3 = 0,05 \text{ K}^4 \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$.

Для самого плохого варианта берём меньшую поверхность теплообмена и большую величину сопротивления Капицы :

$A = 7 \text{ м}^2$; $\alpha = \alpha_3 = \alpha_M = 0,05 \text{ K}^4 \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$.

Тогда:

$$T_{Mmin}(\dot{Q}_M = 0) = \sqrt{\frac{ab}{b-a} \ln \left(\frac{a+b}{b} \right)} \times \sqrt{\frac{(\alpha_3 + \alpha_M) \dot{n}_3}{A}}, \quad (5)$$

где: $T_{Mmin}(\dot{Q}_M = 0)$ — минимальная температура ванны растворения; $a = 25 \text{ Дж/моль} \cdot \text{K}$, $b = 107 \text{ Дж/моль} \cdot \text{K}$ — коэффициенты пропорциональности в соотношениях для молярных теплоемкостей ^3He ($C_3 = aT_3$) и раствора ($C_M = bT_{3,4}$).

Откуда получаем:

$$T_{Mmin} = 2,617 \sqrt{\frac{(\alpha_3 + \alpha_{3,4}) \dot{n}_3}{A}}, \quad (6)$$

что для циркуляции описанной установки ($\dot{n}_3 = 10^{-3}$ моль/с) соответствует

$$T_{Mmin} = 2.617 \left(\frac{10^{-2}}{\sqrt{7}} \right) = 9.9 \text{ мК}, \quad (7)$$

а для циркуляции в режиме экспозиции мишени ($\dot{n}_3 = 2 \cdot 10^{-3}$ моль/с) получаем $T_{Mmin} = 14 \text{ мК}$.

Такой результат вполне соответствует данным, полученным в процессе испытаний установки ($\approx 20 \text{ мК}$), а значит, принятые упрощения действительно мало влияют на точность расчёта. Более того, исходя из этих данных и используя известную формулу [18], можно определить тепловую нагрузку на ванну растворения в данном устройстве:

$$\dot{Q} = 82 \dot{n}_3 (T_M^2 - T_{Mmin}^2), \quad (8)$$

или :

$$\dot{Q} = 82 \cdot 2 \cdot 10^{-3} [(0,02)^2 - (0,014)^2] = 0,03 \text{ мВт}. \quad (9)$$

Таким образом, проведённый расчёт по T_{Mmin} достаточно хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными.

Конструкция рефрижератора этой установки относительно проста, что очень важно на стадии наладки установки, и в то же время позволяет достичь параметров, необходимых для использования в качестве основы поляризованной мишени замороженного типа. Принципиальная схема низкотемпературной ступени рефрижератора растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ показана на Рис. 4.

Минимальная температура раствора при циркуляции $2 \cdot 10^{-3}$ моль/с составила 20 мК , мощность охлаждения соответствует 90 мВт при температуре $0,3 \text{ К}$. Процесс охлаждения установки от комнатной до гелиевой температуры занимает около 10 часов. Время необходимое для конденсации смеси ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ и подготовки рефрижератора растворения к работе составляет примерно два часа. Расход жидкого гелия в замороженном режиме составляет $0,8 \text{ л/час}$, что при объёме бака в 36 литров позволяет работать длительное время без подливки, а в условиях реального физического эксперимента это обстоятельство весьма важно. В рефрижераторах, предназначенных для мишеней с замороженной поляризацией ядер, очень важно также, чтобы время перехода в область сверхнизких температур после завершения процесса динамической поляризации было минимальным. Для данного рефрижератора характерное время охлаждения от $0,3 \text{ К}$ до $0,05 \text{ К}$ составляет примерно четыре минуты. Констатируется, что полученные физико-технические и эксплуатационные параметры созданного рефрижератора растворения ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ удовлетворяют всем необходимым требованиям, предъявляемым к установкам подобного типа.

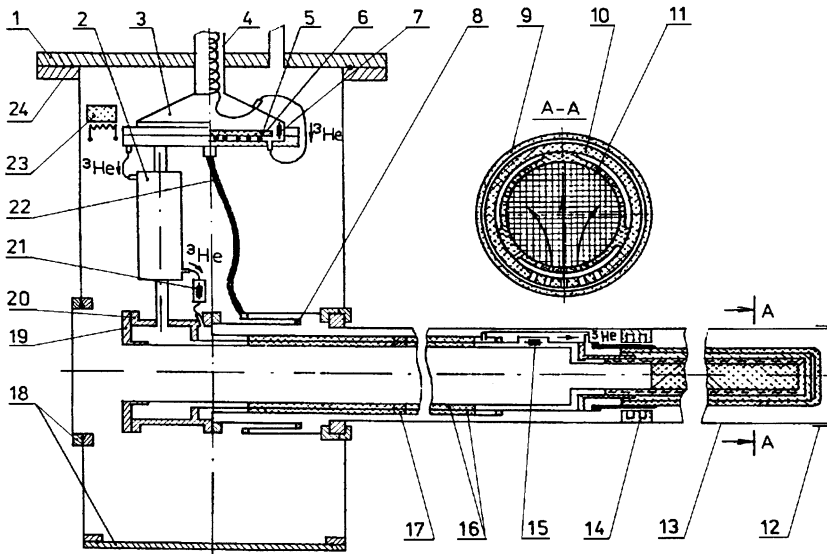


Рис. 4: Схема низкотемпературной ступени рефрижератора растворения ^3He в ^4He .

В ШЕСТОЙ ГЛАВЕ сделан обзор работ по применению мишеней с замороженной поляризацией ядер, созданных в ЛЯП ОИЯИ, для исследования поляризационных явлений на ускорителях ОИЯИ, ПИЯФ и ИФВЭ.

Наиболее значимым результатом исследований в Протвино стало обнаружение в ряде эксклюзивных зарядовообменных реакций асимметрии в образовании нейтральных пионов на уровне $15 \div 30\%$.

Долговременная и успешная работа, начиная с 1976 г., этих установок, использовавшихся как в протонном так и дейтронных вариантах, показало их высокую надёжность и эффективность.

Замороженная поляризованная мишень, созданная в 1994 г. специально для экспериментов при низких энергиях, используется в настоящее время на ускорителе Ядерного Центра Карлова университета (Прага). Пучок поляризованных нейтронов (≈ 16 МэВ) с поперечным направлением поляризации ($\approx 16\%$) получается от реакции $^3\text{H}(d, n)^3\text{He}$ при энергии дейтронов 2 МэВ.

Полученные в Праге физические результаты [10] по измерению разности сечений $\Delta\sigma_T$ и $\Delta\sigma_L$ (разности полных сечений при поперечной и продольной поляризации мишени и пучка соответственно) позволили по новому взглянуть на ранее полученные данные в этой области энергий. Ранее авторы некоторых экспериментальных данных (Bonn, Erlangen) выдвигали гипотезу о минимальной величине параметра смешивания ϵ_1 , определяемого из $\Delta\sigma_T$ и $\Delta\sigma_L$, в области 15 МэВ. Наши результаты, показанные на Рис. 5, не подтверждают эту гипотезу

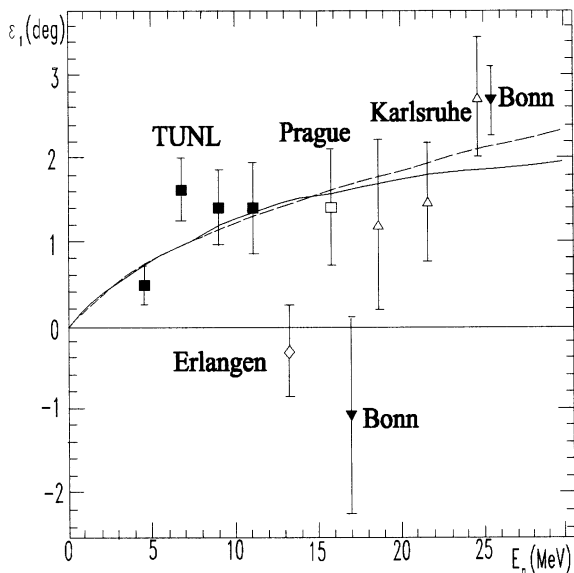


Рис. 5: Сводные данные по измерению параметра ϵ_1 в области низких энергий.

и это хорошо согласуется не только с остальными экспериментальными результатами в этом энергетическом диапазоне, но и с модельными предсказаниями [29].

В 1997 году поляризованная мишень была модернизирована с целью использования в качестве материала мишени дейтерированного пропандиола. Также была усовершенствована детектирующая аппаратура. Осенью 1997 года был проведен методический сеанс, в ходе которого была достигнута поляризация дейтронов около 40%, что позволит провести измерения $\Delta\sigma_T$ и $\Delta\sigma_L$ упругого nd -рассеяния. Таким образом, поляризованная мишень приобрела принципиально новые возможности получения и измерения поляризации различных ядер.

Следует отметить также, что поляризационные исследования, проводимые нами в Праге, до последнего времени, являлись единственным примером в

ОИЯИ — проведения эксперимента на ускорителе страны-участницы.

Так как параметры нейтронного пучка на ускорителе Карлова университета строго фиксированы, дальнейшее развитие экспериментальной установки предполагается получить, в большей степени, за счет расширения возможностей поляризованной мишени: применения дейтерированных мишеней и предварительно облучённого ${}^6\text{LiD}$, исследование которого планируется начать в ближайшее время.

Мишени с замороженной поляризацией ядер нашли широкое применение в крупнейших исследовательских центрах мира и используются в диапазоне энергий от нескольких МэВ до сотен ГэВ. Кроме этого уместно сказать о планируемых в ближайшее время ещё трёх поляризационных экспериментах (ИТЭФ, CERN, ИФВЭ–"РАМПЕКС") с возможным участием в них сотрудников ЛЯП, что свидетельствует об актуальности развития этого методического направления в ОИЯИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже кратко сформулированы основные результаты, полученные автором или при его активном участии и вошедшие в диссертацию:

1. Разработаны, исследованы и реализованы несколько вариантов рефрижераторов растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ с рекордными параметрами по холодопроизводительности, предельной температуре, надёжности работы, оптимально совмещенными в одной установке. Эти рефрижераторы явились основой впервые созданных в нашей стране действующих твёрдотельных поляризованных мишеней "замороженного" типа используемых в физических исследованиях в ПИЯФ, ИФВЭ, КУ (Прага).
2. Автором предложена и реализована модификация протонной поляризованной мишени в дейтронный вариант.
3. Разработан, исследован и создан мощный (≥ 100 мВт) рефрижератор растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ для мишени объемом 120 см^3 с замороженной поляризацией ядер. Результаты проведённого расчёта низкотемпературного теплообменника хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными, что свидетельствует об оптимальности выбранной конструкции.
4. Применение созданных мишеней с замороженной поляризацией ядер водорода и дейтерия позволило провести широкий круг экспериментальных исследований физических параметров взаимодействия частиц, зависящих от спинового состояния ядер. Эти исследования были проведены на ускорителях ОИЯИ, ИФВЭ, ПИЯФ и КУ (Прага). Особый интерес представляют физические результаты по измерению разности сечений $\Delta\sigma_T$ и $\Delta\sigma_L$, полученные на ускорителе Карлова университета. Они позволили по новому взглянуть на ранее полученные данные в этой области энергий.
5. На основе поляризованной мишени (ANL-Saclay) впервые реализован вариант из функционально связанных блоков установки. Это позволило создать "передвижной" вариант поляризованной мишени с возможностью в сжатые сроки перемещать мишень для работы на другом пучке.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 февраля 2000 года.

Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 25.02.2000

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 2,43

Тираж 100. Заказ 51881

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области