

K-44

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1 - 12294

КИСЕЛЕВ
Юрий Федорович

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПРОТОНОВ
ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1979

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Б.С.Неганов.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук С.Б.Нурушев (ИФВЭ),

кандидат физико-математических наук В.И.Лушников (ОИЯИ, ЛНФ).

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Ленинградский институт ядерной физики г.Гатчина.

Защита диссертации состоится " " _____ 1979 года
в _____ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " _____ 1979 года.

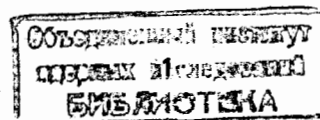
Ученый секретарь Специализированного совета
кандидат физико-математических наук

Ю.А.Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Эксперименты с поляризованными мишенями (П.М.) составляют в настоящее время значительную часть экспериментальных программ всех ускорителей. Для проведения ряда таких экспериментов нами разработана^{1,2/} и впервые в мире испытана на синхроциклотроне Дубны П.М. нового "замороженного" типа. По сравнению с поляризованной мишенью первого поколения на основе лантан-магниевого нитрата (LMN) в новой мишени содержится приблизительно в 3 раза больше ядер водорода, значительно меньшее количество сложных ядер, мишень имеет близкую к 100% и весьма однородную по объему поляризацию ядер. Кроме этого, мишень с поляризованными ядрами может быть перенесена на длительное время из однородного и достаточно сильного магнитного поля (≈ 25 кГс), необходимого для получения высокой поляризации, в слабое и неоднородное (≈ 5 кГс) магнитное поле, сформированное из условия необходимой апертуры магнита для выхода из мишени вторичных частиц. В целом исключительно высокие эксплуатационные параметры мишени нового типа указывают как на возможность осуществления принципиально новых экспериментов, так и на качественное изменение уровня исследований в физике поляризационных эффектов.

Цель работы: решение ряда физико-технических проблем, связанных с созданием комплекса физической аппаратуры "замороженной" поляризованной мишени и применение этого комплекса для оптимизации и измерения основных характеристик мишени. Указанная цель была достигнута созданием прецизионной аппаратуры для измерения высокой ядерной поляризации мишени, аппаратуры для измерения активных сопротивлений при сверхнизких температурах, прецизионного источника тока сверхпроводящего магнита, созданием установки для оптимизации параметров мишени и измерением эксплуатационных характеристик, необходимых для расчета режима работы мишени на ускорителях.



Научная новизна

1. Разработан прецизионный прибор для измерения высокой поляризации мишеней с точностью (2-2,5)%, в зависимости от условий измерения, что в 2+3 раза превышает точность ранее существовавших приборов.
 2. Получено приближенное аналитическое выражение для поправки на нелинейность Q -метров с автоматической подстройкой частоты (АПЧ) и без АПЧ.
 3. Разработан простой геометрический метод определения поправки. Показано, что функция $d_x(s)$ имеет минимум.
 4. Разработана методика определения параметров, необходимых для вычисления поправки на нелинейность.
 5. Для подтверждения правильности расчетов поправки и правильности измерения поляризации осуществлено сравнение теории с экспериментальными данными по ЯМР спектроскопии, а также измерение поляризации мишени независимым методом по упругому р-р-рассеянию.
 6. Предложен импульсный метод измерения активных сопротивлений при сверхнизких температурах.
 7. Разработан метод оптимизации параметров поляризованных мишеней, основанный на приближенной оценке фактора "утечки" поляризации по отношению времени ядерной релаксации ко времени накачки поляризации.
 8. Обнаружено различие во временах релаксации положительной и отрицательной поляризации при одной и той же температуре раствора He^3 в He^4 .
 9. Измерены рабочие характеристики уникальной поляризованной мишени "замороженного" типа. Основные из них - время ядерной релаксации в поле 25,6 кГс составляет 30 суток, в поле 6 кГс - 6 суток при $T = 0,04$ К. Время принудительного разрушения поляризации от максимального значения $98 \pm 2\%$ до нуля равно 12 мин. Время получения максимальной поляризации $98 \pm 2\%$ составляет 3 часа.
- Практическая значимость. Созданные приборы и полученные результаты могут найти следующие практические применения:

1. Q -метр может быть использован для прецизионного измерения поляризации протонных, дейтерированных и т.д. мишеней. Прибор может быть использован в качестве прецизионного магнитометра, а также в качестве приемной части спектрометра ЯМР низкого разрешения. В широкой практике прибор может быть использован, например, для прецизионного измерения концентрации различных парамагнитных ядер в веществе.

2. Прецизионный источник тока (0-100)А может быть применен в любой низкотемпературной лаборатории для работы со сверхпроводящими магнитами.

3. Импульсный метод измерения активных сопротивлений используется для измерения сверхнизких температур. Прибор может быть применен в широкой практике для измерения сопротивления электрических цепей, в которых действуют постоянные или медленно изменяющиеся ЭДС, когда их отключение невозможно.

4. Установка для оптимизации параметров поляризованных мишеней со сменой образцов при гелиевых температурах может быть использована для поиска новых, еще более перспективных для ядерной физики веществ мишеней.

5. Измеренные параметры "замороженной" протонной мишени необходимы для расчета режима ее эксплуатации на ускорителях.

Объем работ. Диссертация изложена на 115 страницах машинописного текста и состоит из краткого введения, обзорной главы, и трех глав, содержащих основные результаты, полученные автором. Диссертация содержит 34 рисунка и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко описаны основные применения поляризованных мишеней в физике элементарных частиц. Рассмотрены преимущества мишеней нового "замороженного" типа по сравнению с мишенью на основе $LiNH_2$. Объем введения - 4 страницы машинописного текста.

Первая глава является обзорной. Основное внимание в ней уделено описанию теории "динамического охлаждения" - метода получения высокой ядерной поляризации мишеней. Принципы метода иллюстрируются рассмотрением теории в случае выполнения высокотемпера-

$$\frac{\omega_{H2} - \omega_0}{\omega_0} = -\frac{x'}{2Q\Gamma} - \frac{\pi n R_z x''}{2Q\Gamma} + \frac{R_z x''}{2\Gamma^2 \beta_2} + \frac{R_z}{Q\Gamma^2} [1, S + \pi n R_z Q] x' \beta_2. \quad (2)$$

В этой формуле:

$$Q_p = \frac{\omega_0}{2(\Delta\omega)_{\sqrt{2}}} = Q \frac{1 + \frac{\pi}{2} n \left(\frac{z_0}{\omega_0 L_0} + \frac{\omega_0 L_0}{z_0} \right)}{1 + \beta_2 Q \left(\frac{z_0}{\omega_0 L_0} + \frac{\omega_0 L_0}{z_0} \right)}, \quad (3)$$

$$\Gamma = 1 + \pi \frac{n}{2} \left(\frac{z_0}{\omega_0 L_0} + \frac{\omega_0 L_0}{z_0} \right), \quad (4)$$

$$x' = 4\pi n Q f', \quad x'' = 4\pi n Q f'', \quad f = f' - j f'', \quad (5)$$

- Q и Q_p - добротность приемного контура без коаксиального кабеля и с кабелем соответственно;
 $\beta_2 = \beta e^{\ell}$ - произведение коэффициента затухания на длину коаксиального кабеля;
 n - число полуволин, укладываемых на длине кабеля;
 ω_0 - центральная частота развертки и частота настройки кабеля;
 z_0 - волновое сопротивление кабеля;
 $2(\Delta\omega)_{\sqrt{2}}$ - ширина резонансной кривой контура с коаксиальным кабелем на уровне $\sqrt{2}$ от значения импеданса в минимуме.

$$R_z = 1/Z_R = R/z_0.$$

Как следует из формулы 1, при $S = 1$ (без АПЧ) $\omega_{H2} = \omega_{H1}$, т.е. частота настройки контура зависит только от магнитной восприимчивости образца. При $S \rightarrow \infty$ (случай "жесткой" АПЧ) частота настройки контура совпадает с частотой генератора. В общем случае произвольного S выражение (2) может быть использовано для прецизионного измерения сигнала дисперсии по напряжению на выходе ФАПЧ (рис. 1). С точки зрения прецизионного измерения высокой ядерной поляризации мишени воздействие АПЧ заключается в линеаризации связи между изменением модуля импеданса приемного контура за счет ЯМР поглощения и мнимой частью f'' высокочастотной магнитной восприимчивости образца. Тем не менее эта связь остается нелинейной и зависит от f' , f'' , f''^2 расстройки δ частоты генератора Q -метра относительно частоты настройки кабеля и т.д. В результате при точном определении поляризации $p \sim \int f''^2 d\omega$

по относительному изменению модуля импеданса приемного контура за счет \int необходимо вводить поправку на нелинейность δ_2 :

$$P_{H3M} = P(1 + \delta_2), \quad (6)$$

где P_{H3M} и P - измеренное и действительное значения поляризации мишени соответственно.

Впервые с помощью приближенного расчета нам удалось получить аналитическое выражение для зависимости $\delta_2(S)$ при произвольном параметре $1 \leq S \leq \infty$:

$$\delta_2(S) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \int_{\omega_1}^{\omega_2} V_E'' d\omega + \frac{1}{2S^2} \int_{\omega_1}^{\omega_2} V_E' d\omega + C_0 \int_{\omega_1}^{\omega_2} V_E'^2 d\omega - \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{\delta}{\delta_{\sqrt{2}}} V_E' d\omega \right\} - 1. \quad (7)$$

В этой формуле:

$$\delta_{\sqrt{2}} = \Delta\omega_{\sqrt{2}}/\omega_0 = (2Q_p)^{-1}, \quad \delta = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}, \quad (8)$$

$$C_0 = \frac{\delta}{2} \left(1 - \frac{1}{S} \right) \left\{ \gamma \left(1 - \frac{1}{S} \right) + 4\pi n R_z Q \left[1 - \frac{1}{2\Gamma} \left(1 - \frac{1}{S} \right) \right] \beta_2 \right\}, \quad (9)$$

$$\gamma = \pi n R_z Q / Q_p, \quad (10)$$

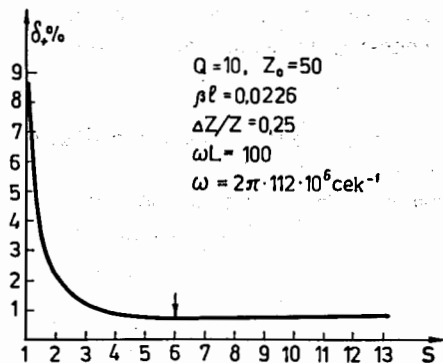
$$V_E'' = \frac{x_E''}{1 + \beta_2 Q \left(\frac{z_0}{\omega_0 L_0} + \frac{\omega_0 L_0}{z_0} \right)}; \quad V_E' = \frac{x_E'}{1 + \beta_2 Q \left(\frac{z_0}{\omega_0 L_0} + \frac{\omega_0 L_0}{z_0} \right)}, \quad (11)$$

$$V_0 = \left\{ \int_{\omega_1}^{\omega_2} |E| V_E'' d\omega - \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{\delta}{\delta_{\sqrt{2}}} |E| V_E' d\omega \right\}, \quad (12)$$

E - коэффициент усиления ядерной поляризации. Если добротность контура невелика, т.е. $\delta' \ll \delta_{\sqrt{2}}$, то выражение для $\delta_2(S)$ может быть упрощено:

$$\delta_2 = \frac{1}{2S^2} \int_{\omega_1}^{\omega_2} V_E'^2 d\omega / \int_{\omega_1}^{\omega_2} V_E'' d\omega - \int_{\omega_1}^{\omega_2} V_E'^2 d\omega / \int_{\omega_1}^{\omega_2} V_E'' d\omega. \quad (13)$$

По формуле 7 на рис. 2 построен график зависимости $\delta_2(S)$. Из графика видно, что Q -метр с АПЧ (при $S \geq 3$) обладает приблизительно в 7 раз меньшей поправкой на нелинейность и, следовательно-



$Q = 10, Z_0 = 50$
 $\beta l = 0,0226$
 $\Delta Z/Z = 0,25$
 $\omega L = 100$
 $\omega = 2\pi \cdot 112 \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$

Рис. 2
 Зависимость поправки на нелинейность Q -метра от фактора автоподстройки.

но, гораздо большим динамическим диапазоном по коэффициенту усиления ядерной поляризации по сравнению с Q -метром без АПЧ ($S = 1$). Расширение динамического диапазона позволяет существенно сократить время, необходимое для калибровки Q -метра за счет измерения неусиленного сигнала ЯМР при более высокой температуре ($1,3 \text{ K}^{3/2}$ вместо $0,7 \text{ K}$ в ЦЕРН'e), где время ядерной релаксации значительно короче. При $S = 6$, как это видно из рис. 2, функция $\delta_s(S)$ имеет минимум. Правильность расчета по формуле 7 подтверждается сравнением с расчетом по точной формуле для импеданса контура на ЭВМ и сравнением с экспериментом.

Другим полезным действием АПЧ является уменьшение в $K = S^2$ раза амплитуды огибающей амплитудно-частотной характеристики контура после детектора при изменении частоты генератора ГВЧ. Окончательная коррекция этой огибающей осуществляется в усилителе постоянного тока УНЧ-1 (рис. 1) сигналами от блока БФИ прямоугольной, параболической и пилообразной формы. В этом же усилителе производится компенсация постоянной составляющей протектированного ВЧ-напряжения. Для стабилизации уровня скомпенсированного напряжения на выходе УНЧ-1 применяется автоматическая подстройка фазы (АПФ) опорного напряжения схемы ФАПЧ. Схема АПФ вырабатывает постоянное напряжение, пропорциональное отклонению базовой линии развертки от нулевого уровня. Это напряжение управляет фазой опорного напряжения с помощью фазовращателя (ВЧФВ) таким образом, чтобы настройкой контура устранить дрейф базовой линии развертки. В результате достигается высокая точность измерения площади сигнала ЯМР. При измерении поляризации впервые

использован комбинированный способ измерения усиленного и неусиленного сигналов ЯМР. При этом способе площадь усиленного сигнала измеряется сразу же после УНЧ-1 (переключатель Π_T в положении 2). Измерение неусиленного сигнала осуществляется после дополнительного усиления (УНЧ-2) усилителем с закрытым входом и последующего восстановления постоянной составляющей (переключатель Π_T в положении 1) схемой (СВПС). Такой способ сочетает в себе высокую точность измерения как усиленного, так и неусиленного сигналов ЯМР. После динамической ориентации ядер поляризация мишени определяется по следующей формуле:

$$P_{изм} = \frac{S_2 \cdot K_0}{S_0 \cdot K_1} \cdot P_0, \quad P_0 = 1,0217 \cdot 10^{-7} \frac{H}{T}, \quad (14)$$

где T - температура в [К]; H - магнитное поле в [Эрст];
 S_0, S_2 - интегральные интенсивности термически равновесного и усиленного сигналов ЯМР соответственно; K_0 и K_1 - коэффициент усиления усилителя УНЧ-2 при измерении S_0 и S_2 соответственно; P_0 - термически равновесное значение ядерной поляризации.

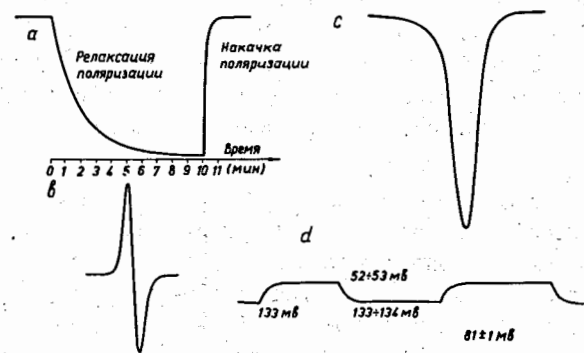


Рис. 3. а - зависимость поляризации от времени при релаксации и накачке усиленного сигнала $1,2$ пропандиола;
 в, с, д - запись производной, формы и интегральной интенсивности линии ЯМР.

Как уже отмечалось выше, Q -метр позволяет работать в трех возможных режимах, а именно - записи формы (рис. 3с), производной формы (рис. 3в) и интегральной интенсивности (рис. 3д) линии ЯМР. Впервые примененный нами в Q -метре, стробоскопический интегратор

является универсальным устройством для обработки и накопления сигналов ЯМР во всех этих режимах работы. Кроме этого, с помощью интегратора контролируется напряжение на детекторе в промежутке между импульсами развертки частоты. Достигнутая точность измерения поляризации составляет (2-2,5)%, в зависимости от условий измерения. Относительная точность измерения усиленных сигналов - 0,3%.

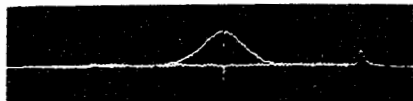


Рис. 4. Неусиленный сигнал ЯМР при тепловом равновесии с решеткой ($T = IK$).

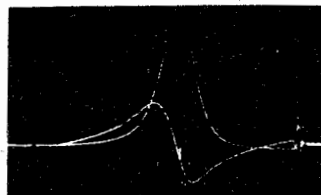


Рис. 5. Форма линии дисперсии и поглощения усиленных сигналов ЯМР.

В экспериментальных результатах главы на основании приближенного аналитического расчета объясняются зависимость амплитуды сигнала ЯМР от его положения относительно начала развертки частоты, а также величина остаточных искажений "крыльев" сигнала поглощения. На рис. 4-5 приведены фотографии неусиленного сигнала ЯМР и усиленных сигналов поглощения и дисперсии в случае 1,2 пропандиола.

В третьей главе приведено описание стабильного источника тока сверхпроводящего магнита^{6,7,8/} и импульсного омметра^{9/} для измерений активных сопротивлений при сверхнизких температурах. Оба прибора могут быть использованы для широкого круга экспериментальных задач. Источник тока (0-100)А - компактный, высокостабильный ($7 \cdot 10^{-6}$ час.) прибор настольного типа. Прибор имеет двойное управление током, что позволяет легко устанавливать с высокой точностью ток в соленоиде и настраиваться на резонансную частоту сигнала ЯМР.

Далее приведено описание импульсного измерителя активных сопротивлений при сверхнизких температурах. В приборе совмещены достоинства обычных измерителей сопротивлений постоянного тока, а именно независимость показаний от реактивных параметров измеряемой цепи и измерителей сопротивлений переменного тока. Характерным преимуществом последних является возможность исключения

влияния термо-ЭДС, действующих в измерительной цепи. Суть метода заключается в зондировании измеряемого сопротивления импульсами с заданной постоянной составляющей тока фурье-спектра:

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt, \quad (15)$$

где T - период импульсов; $I(t)$ - импульс тока, форма импульса которого, вообще говоря, может быть произвольной.

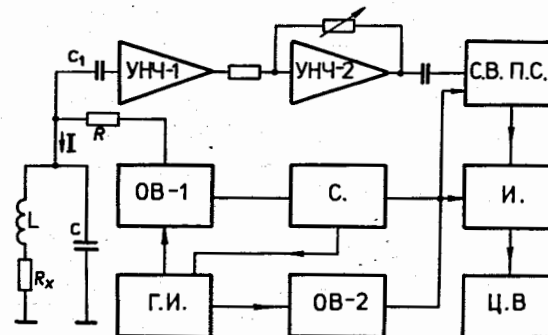


Рис. 6. Упрощенная блок-схема импульсного омметра. УНЧ-1, УНЧ-2 - усилители низкой частоты; ОБ-1, ОБ-2 - одновибраторы; Г.И. - генератор импульсов, С - синхронизатор, С.В.П.С. - схема восстановления постоянной составляющей; И - интегратор; Ц.В. - цифровой вольтметр.

Упрощенная блок-схема прибора показана на рис. 6. Здесь L , C и R_x - соответственно паразитные индуктивность и емкость подводимого кабеля, а также измеряемое сопротивление. Сопротивление R определяет мощность, подводимую к R_x при измерении, и выбирается из условия $R \gg R_x$, так же как и в обычном измерителе сопротивлений с заданным током. После усиления широкополосными усилителями УНЧ-1 и УНЧ-2 с закрытым входом осуществляется восстановление постоянной составляющей и ее измерение интегратором, подобно измерению интегральной интенсивности неусиленного сигнала ЯМР (см. главу II диссертации). Время интегрирования задается длительностью одновибратора 2, которая по условию выбирается такой, чтобы интегрировался весь искаженный за счет паразитных L и C импульс. При этом, как следует из принципа работы прибора и проверено нами экспериментально, напряжение на выходе интегратора определяется только R_x и не зависит от L и C . При скважности

$\varphi = 10$ достигнутое тепловыделение в сопротивлении $R_x = 10$ кОм составило $1,6 \cdot 10^{-14}$ Вт, что соответствует лучшим достигнутым результатам при ошибке измерения $\approx 1\%$. Достоинством прибора является высокая помехоустойчивость, достигаемая за счет выключения его чувствительности в промежутках между зондирующими импульсами, а также за счет быстрого восстановления чувствительности широкополосных усилителей низкой частоты.

В четвертой главе описаны эксперименты по динамической поляризации протонов в 1,2 пропандиоле с примесью C_r^{III} . С целью оптимизации параметров мишени и отработки технологии ее производства первоначально эксперименты проводились при температуре 1 и 1,28К на специальной установке /10/ со сменными при гелиевых температурах образцами. Основным критерием для отбора образцов было выбрано отношение времени ядерной релаксации (T_1) ко времени накачки поляризации τ_H . Как следует из высокотемпературной теории динамического охлаждения (см. главу I диссертации), эта величина при оптимальных условиях накачки приблизительно определяется отношением факторов "утечки" поляризации, сравниваемых образцов:

$$\frac{1 - (T_1/\tau_H)_1}{1 - (T_1/\tau_H)_2} \approx \frac{f_2}{f_1}, \quad (16)$$

где индексы "1" и "2" относятся к сравниваемым образцам.

Следует отметить, что для поляризованной мишени "замороженного" типа принципиально необходимо максимальное отношение T_1/τ_H и минимальный фактор "утечки". Как следует из теории Боргини, последнее утверждение означает получение максимальной ядерной поляризации. В случае 1,2 пропандиола предложенная выше методика контроля образцов позволяет оптимизировать (по максимуму поляризации) концентрацию парамагнитной примеси C_r^{III} и минимизировать концентрацию C_r^{III} . На рис. 7 показан характерный вид зависимости поляризации от времени при релаксации и накачке поляризации для одного из образцов 1,2 пропандиола с примесью C_r^{III} . Из графика легко определить отношение T_1/τ_H , которое изменяется от 3 до 7 (при $T = 1$ К) в случае наиболее качественных образцов. При этом оптимальный образец был выбран по максимальному отношению $T_1/\tau_H = 7$ с максимальной поляризацией $\approx 45\%$ при $T = 1$ К. Технология приготовления оптимального образца существенно отличалась /11/ от общепринятой. Кроме оптимизации образца удалось

добиться и экспериментально подтвердить повторяемость параметров мишени для различных образцов, приготовленных по одной и той же технологии. Поэтому в дальнейшем измерения параметров мишени при 1,0 К не требовалось.

Продолжение исследования оптимального образца осуществлялось при сверхнизких температурах на "замороженной" поляризованной мишени /1,2/. Основу последней составляет мощный рефрижератор растворения жидкого Ne^3 в Ne^4 конструкции Н.С.Борисова, Б.С.Неганова и Ю.А.Усова. Аппаратура контроля поляризации, накачки поляризации, измерения температуры, питания сверхпроводящего соленоида разработана автором диссертации и описана в главах данной диссертации.

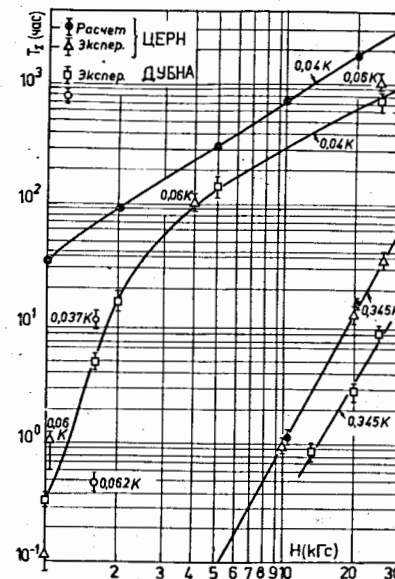


Рис. 7. Зависимость времени ядерной релаксации от поля при различных температурах. \square - наши экспериментальные данные при температурах 0,04К и 0,345К; \bullet - расчет по формулам, описывающим данные ЦЕРН'а для тех же температур; \square - экспериментальные данные ЦЕРН при $T = 0,06$ К и 0,345К; \circ - наши измерения при 0,037К и 0,062К.

На рис. 7 приведена экспериментальная зависимость времени ядерной релаксации от поля при температуре накачки поляризации 0,345К и при температуре "замораживания" - 0,04К. На рис. 8 показана зави-

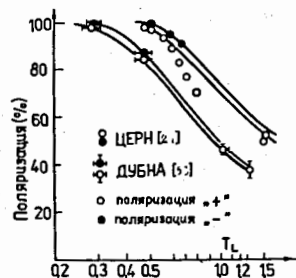


Рис.8. Зависимость поляризации от температуры раствора He^3 в He^4 . Для сравнения приведены зависимости поляризации от температуры мишени, полученные в ЦЕРН^е и теоретическая зависимость по формулам Боргини (сплошные линии).

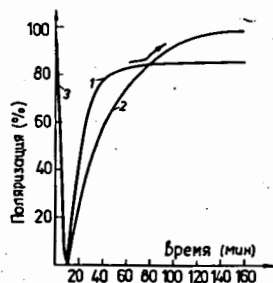


Рис.9. Временная зависимость поляризации при накачке и реверсе поляризации. 1 - накачка положительной и отрицательной поляризации оптимальной мощностью СВЧ; 2 - накачка поляризации вдвое меньшей, по сравнению с оптимальной мощностью; 3 - разрушение поляризации при изменении знака поляризации.

симость максимальной ядерной поляризации от температуры, а на рис. 9 зависимость поляризации от времени накачки при температуре 0,34К (кривая 1) и при температуре 0,25К (кривая 2). Эти данные сравниваются с результатами, полученными в ЦЕРН^е, и объясняются возможные причины расхождения. В частности, отличие наших результатов от данных ЦЕРН^а на рис. 8 объясняется наличием скачка Капицы на границе исследуемого образца с раствором He^3 в He^4 , а также более высокой концентрацией парамагнитных примесей в нашем случае. При очень низких температурах нами впервые было обнаружено различие во временах релаксации положительной и отрицательной поляризации при одной и той же температуре раствора He^3 в He^4 . Все измеренные параметры необходимы для расчета режима работы мишени на ускорителях и указывают на исключительно высокие экспериментальные характеристики мишени нового типа.

В заключении главы приведены основные экспериментальные результаты по определению поляризации мишени независимым методом по известной поляризации в упругом Р-Р рассеянии. Хорошее совпадение абсолютного значения поляризации мишени, измеренной Q-метром, с результатами измерения поляризации по упругому Р-Р-рассеянию указывает на высокую точность нового Q-метра и правильность расчета поправки на нелинейность \mathcal{L}_2 . Таким образом, основные результаты, полученные в диссертации, можно кратко сформулировать в виде следующих выводов:

1. Впервые обнаружено различие во временах релаксации положительной и отрицательной поляризации при одной и той же температуре раствора He^3 в He^4 .

2. Впервые получены экспериментальные характеристики поляризованной протонной мишени "замороженного" типа, необходимые для расчета режима ее эксплуатации.

3. Впервые создан Q-метр с автоматической подстройкой частоты (АПЧ) настройки переменного контура, автоматической подстройкой фазы ВЧ-напряжения и обработкой НЧ-сигнала ЯМР стробоскопическим интегратором. Прибор позволяет осуществить прецизионное измерение ядерной поляризации мишеней с точностью 2-2,5%, что в 2-3 раза превосходит точность ранее применяемых приборов.

4. Впервые получено приближенное аналитическое выражение для поправки на нелинейность Q-метра с АПЧ и без АПЧ.

5. Предложен и реализован импульсный метод измерения активных сопротивлений при сверхнизких температурах.

6. Впервые предложен и реализован метод оптимизации параметров поляризованной мишени путем приближенного измерения отношения факторов "утечки" поляризации сравниваемых образцов.

7. Разработан компактный и стабильный источник тока $(0+100)\text{A}$ сверхпроводящего соленоида.

8. Независимым методом по известной поляризации в упругом Р-Р-рассеянии подтверждена надежность измерения поляризации Q-метром.

Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в работах:

1. Н.С.Борисов, Э.И.Бунятова, Ю.Ф.Киселев, В.Н.Матафонов, Б.С.Неганов, Ю.А.Усов, ОИЯИ, I3-I0357, 1976.
2. Н.С.Борисов, Э.И.Бунятова, Ю.Ф.Киселев, В.Н.Матафонов, Б.С.Неганов, Ю.А.Усов, ПТЭ, №2, 1978.
3. Ю.Ф.Киселев, В.Н.Матафонов, Препринт ОИЯИ, P13-I0101, 1976.
4. Ю.Ф.Киселев, В.Н.Матафонов, ПТЭ №5, 55, 1977.
5. Ю.Ф.Киселев, А.П.Сапожников, ОИЯИ, P13-I0694, 1977.
6. Ю.Ф.Киселев, ОИЯИ, P13-6231, Дубна, 1972.
7. Ю.Ф.Киселев, ПТЭ, №5, 162, 1972.

8. Yu.F.Kiselev. Cryogenics. v.13, No. 7, 434, 1973.
9. Ю.Ф.Киселев, Ю.П.Прокофьев, ОИЯИ, РІЗ-9375, Дубна, 1975.
10. Ю.Ф.Киселев, Н.С.Борисов, В.Н.Матафонов, ОИЯИ, ІЗ-9391,
1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 марта 1979 года.