

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

С 344.2

P13-84-430

4482/84

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

Направлено в "Журнал теоретической  
и экспериментальной физики"

1984



Мишени с поляризованными ядрами водорода и дейтерия находят широкое применение для многих задач физики высоких и промежуточных энергий. Среди большого разнообразия типов мишеней, каждый из которых определяется постановкой конкретного эксперимента, особо выделен класс так называемых "замороженных" мишеней <sup>/5/</sup>. В этих последних поляризация ядер сохраняется практически неизменной за время порядка сотен часов даже в сравнительно слабом  $\sim 0,5$  Т/ магнитном поле. В связи с этим конструкция магнитов, создающих "удерживающее" поле, может быть выбрана такой, что регистрация рассеянных частиц становится возможной в существенно большей области телесных углов.

Дейтерированные пропандиол-1,2  $C_3D_8O_2$  и этандиол  $C_2D_6O_2$  /общее название - диолы/ используются для приготовления мишеней с поляризованными дейтронами. Парамагнитные центры, необходимые для динамического метода поляризации ядер, вводились в эти вещества растворением в них стабильных парамагнитных комплексов пентавалентного хрома <sup>/7,17/</sup>. Как показано в работе <sup>/11/</sup>,  $HMVA-Cr(V)$ -комплекс, например, неустойчив и, вступая в реакцию с растворителем, образует различные парамагнитные комплексы. Присутствие последних может привести к резкому сокращению времени спин-решеточной релаксации, т.е. вещество становится непригодным для "замороженной" поляризованной мишени. До недавнего времени существовало мнение, что стабильный комплекс  $Cr(V)$  не может быть синтезирован в полностью дейтерированных диолах <sup>/6,12/</sup>. Однако в работе <sup>/12/</sup> на примере этандиола показано, что такой синтез возможен, причем, с необходимой для динамического метода поляризации концентрацией парамагнитных центров. Это открывает возможности использования таких веществ в качестве материала для "замороженных" поляризованных мишеней. В предлагаемой работе исследуются процессы динамической поляризации в этих веществах.

## СПИНОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Согласно концепции спиновой температуры <sup>/1,3/</sup>, в твердом теле существуют условия, при которых оказывается возможным выделить отдельную термодинамическую подсистему, связанную со спиновыми степенями свободы. В нашем случае это - ядерные спиновые системы /ЯСС/, разные для ядер разного сорта, и электронная спиновая система /ЭСС/, связанная со спиновыми степенями свободы пара-





магнитных центров. Внутри каждой из систем за время внутренней /спин-спиновой/ релаксации  $\sim \tau_2$  устанавливается статистическое равновесие с характерной спиновой температурой, которая по истечении времени спин-решеточной релаксации  $\sim \tau_1$  становится равной температуре термостата. Необходимое соотношение  $\tau_1 \gg \tau_2$  всегда выполняется для твердого тела при низких температурах. Кроме того, в "замороженных" диолах в широком диапазоне низких температур  $\tau_1 \approx 0,1$  с для ЭСС, тогда как для ЯСС время спин-решеточной релаксации составляет от 1 до  $10^2$  часов в интервале температур от 0,3 до 0,02 К<sup>1/6,8,9/</sup>.

Облучением вещества электромагнитным полем СВЧ-диапазона на частоте, близкой к частоте электронного парамагнитного резонанса /ЭПР/, в ЭСС инициируются циклические процессы, в результате которых понижается спиновая температура в ЯСС. Возникающую при этом связь между ЭСС и ЯСС принято называть индуцированным контактом, посредством которого во всех ЯСС устанавливается единая спиновая температура. Последнее является одной из отличительных черт эффекта, получившего название динамического охлаждения<sup>1/4,6/</sup>. При другом возможном способе понижения температуры ЯСС накачка СВЧ-полем вызывает переходы между магнитными подуровнями системы, состоящей из спина ядра и спина электрона, связанных диполь-дипольным взаимодействием<sup>1/2/</sup>. При этом накачка не затрагивает спинов других ЯСС - так называемый "дифференциальный солид-эффект"<sup>1/6/</sup>.

Связь спиновой температуры  $T_S$  с поляризацией  $P(1/2)$  или  $P(1)$  /в скобках указано значение спина ядра/ описывается выражением для функции Бриллюэна<sup>1/1/</sup>:

$$P(1/2) = \text{th}(\nu_H h / 2kT_S); \quad /1/$$

$$P(1) = \frac{4 \text{th}(\nu_D h / 2kT_S)}{3 + \text{th}^2(\nu_D h / 2kT_S)}; \quad /2/$$

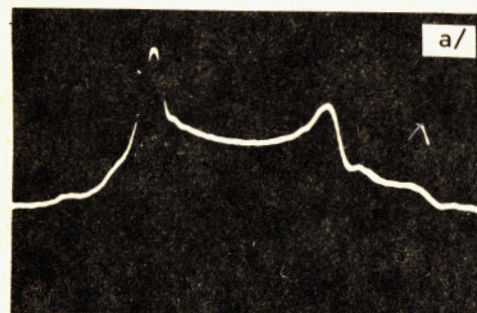
где:  $\nu_H$  и  $\nu_D$  - частоты ядерного магнитного резонанса /ЯМР/ соответствующих ядер;  $k$  - постоянная Больцмана,  $h$  - постоянная Планка.

Измерение поляризации обычно связано с обработкой спектров ЯМР. Наиболее распространенный и широко применяемый для ядер водорода /протонов/ метод основан на линейной зависимости между интегральной интенсивностью спектра ЯМР и поляризацией. В состоянии термического равновесия ЯСС с решеткой поляризации вычисляется по формулам /1/ или /2/, в которых  $T$  нужно положить равной температуре термостата. Однако регистрация равновесных спектров при температуре 0,5 К и магнитном поле 2-3 Т уже для протонов представляет собой достаточно сложную задачу в силу низкого отношения уровня полезного сигнала к уровню шумов и помех<sup>1/6/</sup>. Для ядер дейтерия это отношение ухудшается почти в сто раз<sup>1/6/</sup>. Поэтому для измерения поляризации дейтерия чаще

используется другая возможность - по форме спектра магнитного резонанса дейтронов /ДМР/. На характер спектра ДМР существенное влияние оказывает взаимодействие квадрупольного момента дейтрона  $eQ$  с неоднородным электрическим полем внутри молекулы. Для случая аксиальной симметрии тензора градиента электрического поля со значением вдоль главной оси тензора  $eQ$  /полагая ось  $z$  направленной вдоль внешнего магнитного поля/ в первом порядке теории возмущений можно получить следующее выражение для  $m$ -го уровня магнитной энергии ( $m = \langle I_z \rangle$ ) дейтрона ( $I = 1$ )<sup>1,5/</sup>:

$$E_m = -\nu_D h m + \frac{e^2 q Q}{8} (3 \cos^2 \theta - 1) [3m^2 - I(I+1)]. \quad /3/$$

Первое слагаемое описывает зеемановское расщепление:  $\nu_D$  - центральная частота спектра ДМР. Вклад квадрупольного взаимодействия зависит от  $\theta$ -угла между осью  $z$  и главной осью тензора градиента электрического поля, направление которой полагают совпадающим с направлением C-D- или O-D-связей<sup>1/8/</sup>. В замороженных



диолах - аморфных веществах - все ориентации C-D- и O-D- связей равновероятны. Смещения уровней энергии зеемановского

$$\text{расщепления, кратные } \nu_Q = \frac{e^2 q Q}{8h},$$

приводят к тому, что функция формы спектра ДМР /рис.1/ представляет собой суперпозицию двух кривых 2 и 3, соответствующую

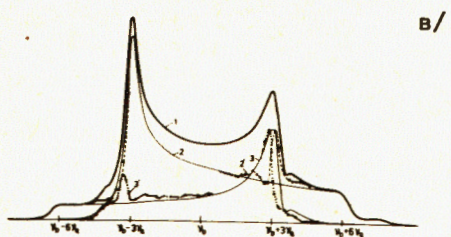
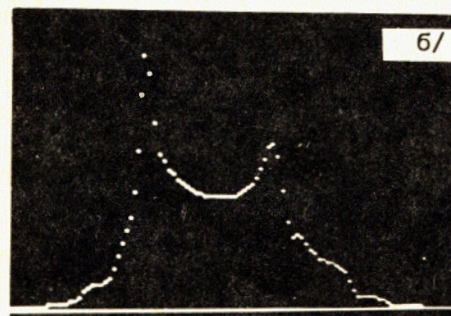


Рис.1. Спектр дейтронного парамагнитного резонанса /максимальная отрицательная поляризация/. а/ Сигнал ДМР на осциллографе; б/ Непрерывный спектр ДМР после аналого-цифрового преобразования выведен на графический дисплей; в/ Обработка спектра ДМР. Полная функция формы спектра /1/ представляет собой суперпозицию двух функций 2 и 3, соответствующих переходам  $m = -1 \rightarrow m = 0$  и  $m = 0 \rightarrow m = 1$ . Прерывистыми кривыми показаны участки, где функции  $\psi_1$  и  $\phi_1$ , а также  $\psi_{a1}$  и  $\phi_{a1}$  не совпадают /подробности в тексте/.



щих переходам  $m = -1 \rightarrow m = 0$  и  $m = 0 \rightarrow m = +1$ . Отношение площадей под этими кривыми принято называть асимметрией. Обозначив через  $n_+$ ,  $n_-$ ,  $n_0$  относительные заселенности уровней с  $m$ , равным соответственно 1, -1, 0, для асимметрии имеем:  $R = (n_+ - n_-) / (n_0 - n_-)$ . Приняв во внимание, что уровни магнитной энергии заселены в соответствии с распределением Больцмана, получим:  $R = n_+ / n_0 = n_0 / n_-$ .

Для поляризации  $P_D$  и выстраивания  $A$ , согласно определениям, имеем <sup>12/</sup>:  $P_D = n_+ - n_-$  и  $A = 1 - 3n_0$  или

$$P_D = \frac{R^2 - 1}{R^2 + R + 1} \quad \text{и} \quad A = \frac{(R - 1)^2}{R^2 + R + 1} \quad /4/$$

По экспериментально найденному значению  $R$  поляризация и выстраивание вычисляются по формулам/4/. Их вывод использует факт существования спиновой температуры в ЯСС, связанной с дейтронами в диолах при низких температурах решетки <sup>16/</sup>.

#### ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Исследуемые вещества представляют собой комплексное соединение пятивалентного хрома Cr(V) в дейтерированных диолах - этандиоле общей формулы  $C_2D_6O_2$  и пропандиоле-1,2 общей формулы  $C_3D_8O_2$ . Процесс динамической поляризации дейтронов был исследован в трех образцах /см. таблицу/. Для увеличения поверхности исследуемые образцы были приготовлены в виде замороженных шариков  $\phi$  2 мм.

Образец № 1 представляет собой комплекс Cr(V) в дейтерированном этандиоле, содержащем дейтерий в замещенном положении 98,5 ат.%. Синтез комплекса описан в <sup>12/</sup>. Спектры электронного парамагнитного резонанса /ЭПР/ комплекса при комнатной и температуре жидкого азота были записаны на спектрометре "Varian - E-12". При комнатной температуре ширина линии  $\Delta H = 4,5 \cdot 10^{-4}$  Т;  $g$  - фактор, вычисленный по положению линии относительно линии иминоксильного радикала - 2,2,6,6 тетраметилпиперидин-1-оксила с  $g = 2,0064$ , равен 1,979. Концентрация парамагнитных центров /п.ц./ составила  $5 \pm 1 \cdot 10^{19}$  п.ц./см<sup>3</sup>. Измерения концентрации проводились путем сравнения параметров  $h(\Delta H)^2$  исследуемого образца и эталонного вещества - иодида дибензолхрома в  $C_2D_6O_2$ .

Образец № 2 также представляет собой комплекс Cr(V) в  $C_2D_6O_2$ . Образец приготовлялся путем разведения исходного образца № 1 с концентрацией  $5 \pm 1 \cdot 10^{19}$  п.ц./см<sup>3</sup>, принятой за единицу, дейтерированным этандиолом в соотношении 1:6.

В настоящей работе нам впервые удалось синтезировать комплекс Cr(V) в полностью дейтерированном пропандиоле-1,2 -  $C_3D_8O_2$  - следующем за этандиолом спиртом в гомологическом ряду диолов. Комплекс Cr(V) был получен в реакции восстановления  $K_2Cr_2O_7$  в  $C_3D_8O_2$ : Дейтерированный пропандиол-1,2, содержащий дейтерий в замещенном положении 98,3 ат.%, по нашей просьбе был разрабо-

Таблица

№ обр.	Вещество	Содержание дейтерия по весу:		Концентрация Cr(V) п.ц./см <sup>3</sup>		Релаксация		Максимальная поляризация P <sub>D</sub>
		дейтерия в %	по весу	п.ц./см <sup>3</sup>	п.ц./см <sup>3</sup>	В(Т):τ (мкс)	τ <sub>1</sub> (час)	
1.	Этандиол (C <sub>2</sub> D <sub>6</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	17,6	(5±1) · 10 <sup>19</sup>	0,32	54	10	-	(0,42 ± 0,02)
					54	15		+
2.	Этандиол (C <sub>2</sub> D <sub>6</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	17,6	1 · 10 <sup>19</sup>	2,08	800	4		0,10
3.	Пропандиол-1,2 C <sub>3</sub> D <sub>8</sub> (OD) <sub>2</sub>	19,0	(6±1) · 10 <sup>19</sup>	0,32	80	1	+	(0,38 ± 0,02)
							-	(0,41 ± 0,02)



тан и приготовлен в ГИПХе. Нами изучена реакция образования комплекса  $\text{Cr(V)}$  в полностью дейтерированном пропаноле с целью определения условий реакции, таких, как температура, время реакции, концентрации исходного бихромата. В результате удалось найти оптимальные условия, которые обеспечивают получение комплекса с концентрацией  $6 + 1 \cdot 10^{19}$  п.ц./см<sup>3</sup> - образец № 3; концентрация измерялась методом ЭПР. Ширина линии ЭПР полученного комплекса при комнатной температуре составляет:  $\Delta H = 5 \cdot 10^{-4}$  Т.

#### УСТАНОВКА. АППАРАТУРА

Эксперименты проводились на установке ППЗМ-200 - протонная "замороженная" мишень с продольным размером /по пучку частиц/ 200 мм<sup>8/</sup>.

Основная часть установки - горизонтальный рефрижератор растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ . Вещество мишени, приготовленное в виде шариков диаметром 2 мм, засыпается в специальный контейнер и вводится по центральному каналу криостата в камеру растворения при температуре жидкого азота. После этого камера растворения закрывается герметичной заглушкой, а центральный канал откачивается. В режиме растворения предварительно охлажденный  $\text{He}^3$  поступает в камеру растворения, заполненную раствором  $\text{He}^3$  в  $\text{He}^4$ , откуда под действием перепада осмотического давления переносится в испаритель и затем откачивается внешней насосной группой.

Для описываемых экспериментов вместо рабочего контейнера в камеру растворения вводилась специальная ампула, сделанная из тефлона /рис.2/. Катушка индуктивности, представляющая собой пять витков посеребренной медной проволоки, намотана на каркас, служащий одновременно контейнером, в который насыпались исследуемые образцы. Коаксиальный кабель, проведенный по центральному каналу, состоит из сплошной трубки из нержавеющей стали диаметром 5 мм, толщиной стенки 0,15 мм и бронзовой жилы диаметром 0,3 мм, зафиксированной на оси трубки распорками из тефлона.  $\text{He}^3$  через отверстия в стенках ампулы и контейнера поступал в объем, заполненный исследуемым веществом снизу, что обеспечивало наилучшие условия растворения /охлаждения/ и исключало возможность возникновения перепада температуры по образцу<sup>9/</sup>. Температура образца определялась по сопротивлению угольных резисторов Speer-100 и Speer-200, калибровка которых была проведена в отдельном опыте по сигналам ЯМР от протонов образца с малым временем спин-решеточной релаксации. Проволочным нагревателем, размещенным в объеме 10 /рис.2/, можно было выделять в ванне растворения фиксированное количество тепловой энергии, что потом использовалось для оценки СВЧ-мощности, рассеиваемой в ванне растворения при накачке. Без подвода СВЧ-мощности остаточное энерговыделение обусловлено в основном теплопритоком по коаксиальному кабелю. Полный паразитный приток тепла в камеру

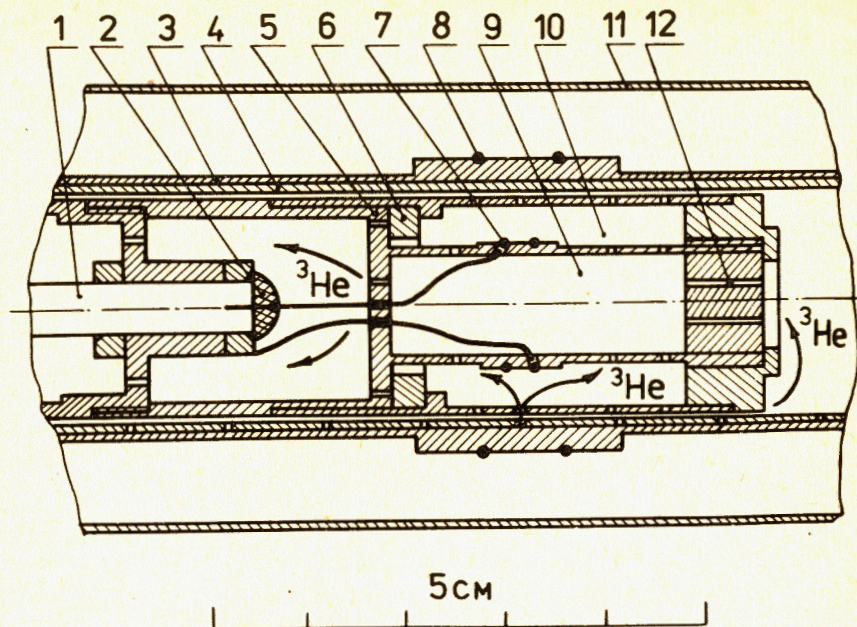


Рис.2. Камера растворения с ампулой для образцов.

1 - кабель радиочастотной катушки, 2 - герметичный электрический ввод, 3-4 - корпус камеры растворения из тефлона, 5 - деталь крепления, 6 - кольцо-заглушка, 7 внутренняя /основная в описываемых экспериментах/ радиочастотная катушка, 8 - внешняя катушка, 9 - объем, заполняемый исследуемым образцом, 10 - объем для нагревателя, 11 - резонатор СВЧ, 12 - пробка.

растворения составил около  $2 \cdot 10^{-4}$  Вт, что повысило минимальную температуру образца до 54 мК.

Для регистрации спектров ЯМР применялся Q-метр, у которого амплитуда сигналов на выходе пропорциональна резонансному поглощению радиочастотной энергии в катушке LC-контура<sup>1,2/</sup>. Спектр ЯМР получается в результате изменения /развертки/ частоты питающего генератора в диапазоне от 13,420 до 13,820 МГц по закону, близкому к линейному.

Параллельный LC-контур образован катушкой индуктивности и емкостью кабеля вместе с параллельной емкостью, подключенной дополнительно на входе Q-метра. Конструкция кабеля такова, что на рабочей частоте импеданс кабеля имел емкостный характер с эквивалентной емкостью 67 пФ. При индуктивности катушки 1,1 мкГн, величина дополнительной параллельной емкости оказалась равной около 60 пФ, что давало возможность подключения ватрикапа с рабочей точкой, смещенной в область оптимальной крутиз-



ны характеристики. Это, в свою очередь, обеспечивало надежную работу системы жесткой фазовой автоподстройки /ФАП/ /13/ собственной частоты LC-контура. Уменьшая примерно в пять раз величину фазового сдвига между напряжением питающего генератора и напряжением на контуре, ФАП позволяла не менее чем в 25-30 раз уменьшать влияние частотной характеристики и механических колебаний контура на величину выходного сигнала Q-метра.

Спектры ЯМР, представлявшие собой периодическую последовательность сигналов длительностью 5 мс и частотой следования 50 Гц, непрерывно наблюдались на осциллографе /рис.1/, а также подавались на аналоговый интегратор с выходом на цифровой вольтметр и самописец. Предварительная обработка спектров осуществлялась с помощью аппаратуры в стандарте КАМАК. После аналого-цифрового преобразователя КА209 /14/ и буферного накопителя КЛО06 /16/ спектр, преобразованный в числовой массив, передавался в память микроЭВМ КМ-001 /15/. Программы предварительной обработки предусматривали следующее: накопление и усреднение спектров с целью выделения из шумов и помех /обычно использовалось до 400 накоплений/, интегрирование, вывод спектра на графический дисплей и запись на магнитную ленту кассетного накопителя РК-1.

Окончательная обработка ДМР спектров производилась на ЭВМ БЭСМ-6 и состояла из трех основных этапов.

1. Преобразование массивов данных к линейной шкале частот, для чего используется соответствующая характеристика питающего генератора, снятая в виде зависимости частоты от интервала времени с момента начала развертки.

2. Для вычисления поляризации  $P_D$  дейтерия использовались соотношения /4/. В предположении аксиальной симметрии тензора градиента электрического поля молекул диолов /10/ функция  $F$ , описывающая полный спектр ДМР, может быть представлена в виде суперпозиции двух кривых  $\phi$  и  $\phi_a$ , симметричных относительно  $\nu_D$  /рис.1/:

$$F = \phi + R\phi_a, \quad (R > 1). \quad /5/$$

К этому добавляются самые общие предположения /1/:  $\phi'_a < 0$  в области  $(\nu_D - 3\nu_Q, \nu_D + 6\nu_Q)$  и  $\phi'_a > 0$  в  $(\nu_D - 6\nu_Q, \nu_D + 3\nu_Q)$ .

Пусть  $F$  разложена в ряд Фурье с коэффициентами  $A_n$  и  $B_n$ , т.е.  $F \sim (A_n, B_n)$ . Для функций  $\phi$  и  $\phi_a$  имеем  $\phi \sim (a_n, b_n)$ ,  $\phi_a \sim (a_n, -b_n)$ , тогда

$$A_n = a_n(1+R) \quad \text{и} \quad B_n = b_n(1-R). \quad /6/$$

Процедура поиска  $R$  осуществляется методом последовательных приближений. По значению  $R_i / i$  - номер итерации/ и по формулам /6/ находят  $a_n^i$  и  $b_n^i$  и затем, суммированием соответствующего ряда, функции  $\psi_i$  и  $\psi_{ai}$ , представленные на рис.1 кривыми 2 и 3. Далее осциллирующие участки этих функций заменяются полиномами второй или более высокой степени, удовлетворяющими условию мо-

нотонности. Вновь полученные функции  $\phi_i$  и  $\phi_{ai}$  показаны на рис.1 кривыми 2 и 3. Если  $R_i$  достаточно близко к  $R$ , то должно выполняться:

$$\delta \equiv \left| \int_{\nu_D - 6\nu_Q}^{\nu_D + 6\nu_Q} (\psi_i - \phi_i) d\nu \right| \leq \epsilon, \quad /7/$$

где  $\epsilon$  задается как параметр точности вычислений; обычно  $\epsilon = 10^{-8}$ . Если неравенство /7/ не выполняется, то по  $\delta$  определяется  $R_{i+1}$  для  $(i+1)$ -ой итерации.

3. Вычисленные значения поляризации должны быть исправлены на величину систематических погрешностей Q-метра /13/. Расчет их для формы линии поглощения, полученной в эксперименте, был проведен по программам, описанным в /13/. Установлено, что  $R_{изм}$  - поляризация, определяемая по асимметрии спектра, выделенного с помощью примененного нами Q-метра, должна быть исправлена по формуле  $P = P_{изм}(1 \pm 0,06)$ , где плюс - для положительной и минус - для отрицательной поляризации. Так же как и в /10/ мы убедились в том, что для всех зарегистрированных нами спектров ДМР величина, равная отношению суммы значений функции формы спектра в пиках к интегральной интенсивности спектра - величина постоянная с точностью не хуже 1%. Это использовалось в качестве одного из критериев достоверности записанной информации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Основные результаты приведены в таблице. Указанные значения поляризации получены за 2-2,5 часа непрерывной накачки при оптимальных условиях, как по частоте, так и по уровню СВЧ-мощности. При накачке полная мощность, рассеиваемая в камере растровения, составляла 10 мВт, что для удельной мощности СВЧ, приходящейся на образец, дает примерно 1 мВт/г. Оптимальная частота определяется по экспериментальным данным, представленным на рис.3. Разность частот, соответствующих максимумам положительной и отрицательной поляризации, составляет 230 МГц. Между точками максимумов нет никаких других заметных пиков, которые, например, могли бы соответствовать дифференциальному солид-эффекту /8/. Это дает основание предположить, что основной вклад в поляризацию дейтронов вносит эффект динамического охлаждения. Для подтверждения такого предположения мы проделали несколько опытов, подобных описанным в /8/. После достижения максимальной поляризации дейтронов выключалась накачка, и аппаратура перестраивалась на наблюдение сигнала магнитного резонанса от протонов /ПМР/, который в соответствии с единой спиновой температурой также достиг максимальной величины. Далее производилось насыщение линии ПМР: воздействием ВЧ-напряжения, подаваемым на ка-



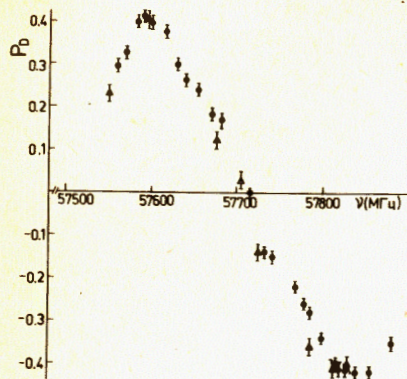
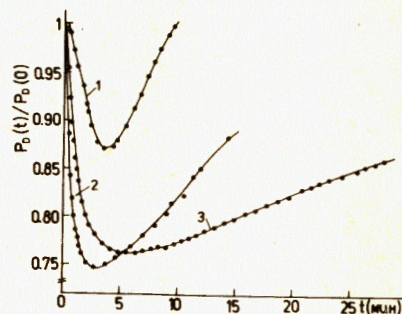


Рис.3. Зависимость предельно достижимой поляризации дейтронов от частоты СВЧ-поля: ● - для этандиола, Δ - для пропандиола-1,2.

Рис.4. Изменения поляризации /спиновой температуры/ дейтронов после включения СВЧ-накачки при неравенстве температур протонной и дейтронной спиновых систем. Кривая 1 получена при мощности СВЧ в 1,5 раза большей, чем кривые 2 и 3; кривая 2 снята для отрицательной поляризации /спиновой температуры/, 1 и 3 - для положительной.



тушку индуктивности на частоте, равной центральной частоте спектра, достигалось уменьшение в 2-3 раза поляризации протонов или, что то же самое, производилось "нагревание" протонной ЯСС. Далее снова наблюдался сигнал ДМР, не претерпевший, естественно, никаких изменений, т.к. без накачки и в высоком поле контакт между спиновыми системами почти полностью отсутствует. Затем вновь включалась накачка и наблюдались изменения поляризации /или спиновой температуры/ в дейтронной ЯСС, показанные на рис.4. Сразу же после включения СВЧ ( $t=0$ ) наблюдались рост спиновой температуры /падение поляризации/ в дейтронной ЯСС и одновременно падение спиновой температуры в протонной ЯСС /на рис.4 не показано/, так что в моменты времени, следующие через 5 - 10 мин. после минимумов на кривых, спиновые температуры всех СС выравниваются. Затем происходит общее понижение спиновой температуры под действием накачки. Три кривые на рис.4 получены при разных уровнях мощности СВЧ, причем, как и следовало ожидать, при большой мощности время установления единой спиновой температуры и относительное падение сигнала ЯМР - меньше. Этот эффект - возникновение индуцированного контакта между всеми ЯСС при облучении вещества СВЧ-полем - наблюдался для всех трех образцов, указанных в таблице. Линия спектра ЭПР, записанная

для образца № 1 при температуре 0,3 К, имеет примерно колоколообразную форму с полушириной, равной приблизительно разности частот, на которых накачиваются максимальная положительная и отрицательная поляризации: 230 МГц или 82 Гс. Таким образом, вся совокупность полученных нами данных подтверждает предположение о том, что основным механизмом динамической поляризации дейтерия в наших образцах является динамическое охлаждение.

На образце № 2 также не обнаружен дифференциальный солид-эффект, а максимальные значения поляризации обоих знаков достигаются на тех же частотах, что и для образца № 1. Таким образом, изменение концентрации не повлияло на ширину линии ЭПР при 0,3 К. Независимость ширины линии ЭПР от концентрации парамагнитных центров указывает на то, что основная причина уширения - анизотропия электронного g-фактора. В связи с этим можно ожидать, что увеличение магнитного поля до 3 Т приведет лишь к незначительному росту поляризации дейтерия, а при дальнейшем увеличении магнитного поля роста предельной поляризации не произойдет<sup>16/</sup>.

Время релаксации  $\tau_1$ , указанное в таблице, получено по измерениям в магнитном поле 0,32 Т в предположении экспоненциального закона падения величины поляризации:  $P = P_0 e^{-t/\tau_1}$ . Экстраполяция этих данных в область температур  $\sim 20$  мК<sup>16/</sup> и в том же магнитном поле дает для  $\tau_1 \geq 100$  час., что вполне достаточно для использования исследованных веществ для "замороженных" поляризованных мишеней.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получена поляризация ядер дейтерия  $+0,40$  в веществе, представляющем собой комплекс Cr(V) в полностью дейтерированных этандиоле и пропандиоле - 1,2 /см.таблицу/.

2. В результате проведенных исследований установлено, что основным механизмом динамической поляризации ядер является эффект динамического охлаждения. Полученные данные позволяют также считать, что внешнее магнитное поле с индукцией от 2 до 3 Т является оптимальным для получения наибольшей поляризации ядер.

3. Измеренные значения времени релаксации ядерной намагниченности в слабом поле позволяют сделать вывод о пригодности исследованных веществ в качестве материала для поляризованных мишеней "замороженного" типа.

Авторы благодарят Ю.М.Казаринова и С.Б.Нурушеву за поддержку экспериментов; Б.С.Неганова и Ю.Ф.Киселева за полезные обсуждения. Авторы благодарны Л.П.Мещанину, В.П.Даньшину, О.В.Щевелеву и А.Ф.Прудкогляду за помощь в проведении экспериментов. Пользуясь случаем, авторы выражают признательность Н.Н.Зацепиной и И.Ф.Ту-



пищину за разработку способа и получение дейтерированных диолов, а также А.П.Юрьевой и Н.Н.Бубнову за помощь в анализе образцов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абрагам А. Ядерный магнетизм. ИЛ., М., 1963.
2. Джеффрис К. Динамическая ориентация ядер. "Мир", М., 1965.
3. Гольдман М. Спиновая температура и ЯМР в твердых телах. "Мир", М., 1972.
4. Ацаркин В.А. Динамическая поляризация ядер в твердых диэлектриках. "Наука", М., 1980.
5. Неганов Б.С. Вестник АН СССР, 1968, № 12, с.49-53; Неганов Б.С. Труды Международной конференции по электромагнитным взаимодействиям при низких и средних энергиях. Изд-во АН СССР, М., 1967, т.4, с.300.
6. De Boer W. Preprint CERN 74-11, Geneva, 1974.
7. Hill D. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1978, 150, p.331-332.
8. Борисов Н.С. и др. ОИЯИ, 1-80-98, Дубна, 1980.
9. Борисов Н.С. и др. Труды международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. ОИЯИ, Д1,2-82-27, Дубна, 1982.
10. Hamada O. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1978, 189, p.561.
11. Бунятова Э.И., Галимов Р.М., Лучкина С.А. ОИЯИ, 12-82-732, Дубна, 1982.
12. Bulyatova E.I., Bubnov N.N. JINR, D1-82-805, Dubna, 1982.
13. Либург М.Ю., Матафонов В.Н. ОИЯИ, P13-81-365, Дубна, 1981.
14. Габриэль Ф. и др. ОИЯИ, P13-11201, Дубна, 1978.
15. Сидоров В.Т. и др. ОИЯИ, P10-12481, Дубна, 1979.
16. Антохов В.А. и др. ОИЯИ, 10-80-650, Дубна, 1980.
17. Hiramatsu S. et al. High Energy Spin Physics. AIP, New York, 1983, p.512.

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 июня 1984 года.

Борисов Н.С. и др.

P13-84-430

Динамическая поляризация ядер дейтерия  
в полностью дейтерированных этандиоле и пропандиоле

Поляризация ядер дейтерия 0,40 получена в полностью дейтерированных этандиоле и пропандиоле-1,2, в которых синтезирован комплекс пятивалентного хрома. Время спин-решеточной релаксации в магнитном поле 0,32 Т при температуре  $T = 0,054$  К составляет  $10 \pm 15$  ч, что позволяет сделать вывод о возможности использования названных веществ в мишенях "замороженного" типа. Проведенные исследования дают возможность заключить, что основным механизмом динамической ориентации ядер дейтерия в указанных веществах является динамическое охлаждение. Приводятся характеристики исследуемых веществ, краткое описание установки, аппаратуры и процедуры обработки спектров магнитного резонанса ядер дейтерия.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Borisov N.S. et al.

P13-84-430

Dynamic Polarization of Deuterium Nuclei  
in Completely Deuterated Ethandiol and Propandiol

The deuteron nucleus polarization about 0.40 of completely deuterated ethandiol and propandiol-1,2 in which Cr(V) complex has been synthesized, is obtained. Spin-lattice relaxation time in the magnetic field of 0.32 T and at  $T=0.054$  K temperature is 10-15 h. That permits to conclude about a possibility to use these materials for spin frozen targets. The performed investigations allow one to conclude that the dynamic cooling is the main mechanism of deuteron nucleus dynamic orientation in such materials. The investigated materials characteristics, experimental techniques brief description, and deuteron nuclear magnetic resonance spectrum processing procedure are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984