

12

## **Модельные испытания системы стабилизации нейтронного магнитного резонанса**

© *Е.Б. Александров, М.В. Балабас, Ю.В. Борисов, С.П. Дмитриев, Н.А. Доватор, А.И. Иванов, И.А. Краснощекова, В.Н. Кулясов, В.В. Марченков, А.С. Пазгалев, А.П. Серебров, В.А. Соловей, Г.Е. Шмелев*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
Всероссийский научный центр „Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова“, С.-Петербург  
Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН, Гатчина  
E-mail: nicolai.dovator@mail.ioffe.ru

*Поступило в Редакцию 27 июля 2006 г.*

Дается краткое описание устройства и приводятся результаты испытания модели многоканальной системы стабилизации магнитного резонанса ультрахолодных нейтронов в мультикамерном спектрометре, предназначенном для поиска электрического дипольного момента нейтрона. Показана возможность достижения стабильности резонансных условий, эквивалентной стабильности магнитного поля  $\sim 30$  фГ зв 100 с измерений.

PACS: 29.30.-h, 13.40.Em, 07.55.Ge

В настоящее время сконструирован и находится в стадии изготовления мультикамерный спектрометр для поиска электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона с проектной точностью  $10^{-27} - 10^{-28}$  е · см [1]. Важнейшей проблемой, возникающей при созда-

нии такой установки, является обеспечение стабильности резонансных условий для нейтронов, поскольку суть ЭДМ-эксперимента состоит в измерении сдвига частоты магнитного резонанса нейтронов при их взаимодействии с реверсируемым электрическим полем. С учетом малости измеряемого сдвига уровень стабильности резонансных условий должен быть очень высоким — порядка  $10^{-13}$  Т за 6 min (длительность одного цикла измерений ЭДМ с удержанием ультрахолодных нейтронов (УХН) при разной полярности электрического поля), чтобы точность измерений ЭДМ нейтрона не была хуже статистической ошибки [1].

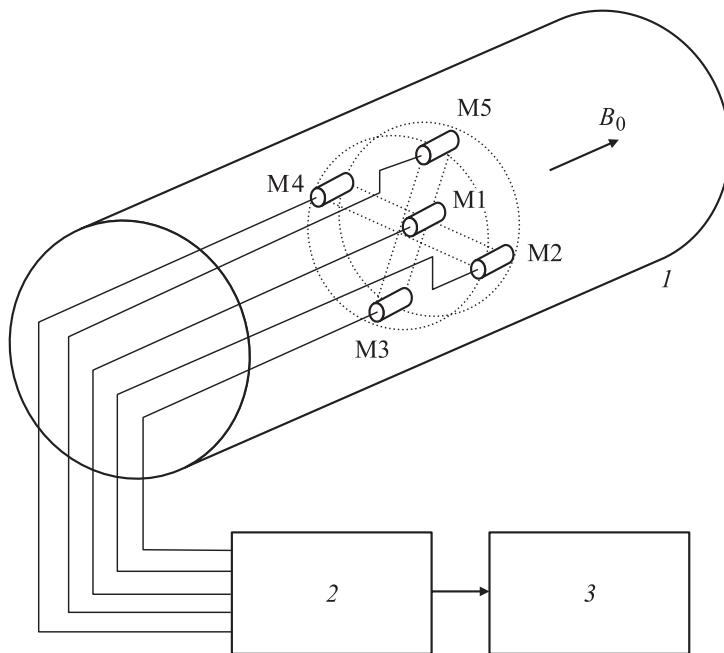
Для подавления влияния магнитных помех на резонанс нейтронов в ЭДМ-эксперименте обычно используется магнитное экранирование камер удержания УХН, в дополнение к которому применяются различные экспериментальные методики [2,3], позволяющие контролировать и учитывать в результатах измерений остаточные вариации среднего рабочего магнитного поля, в котором находятся нейтроны. Поскольку повышенные требования к уровню стабильности в создаваемом спектрометре чрезвычайно сложно обеспечить только с помощью магнитных экранов, было решено использовать метод активной стабилизации нейтронного магнитного резонанса, впервые примененный в работе [4].

С этой целью предусматривается использование 16 высокочувствительных самогенерирующих цезиевых магнитометров, равномерно расположенных вокруг четырех двойных (два отсека с разнонаправленным электрическим полем) камер удержания УХН. С помощью преобразователя частоты на базе смесителей и делителя из выходных сигналов этих магнитометров будет сформирован сигнал резонансного осциллирующего поля для нейтронов, частота и фаза которого изменяется синхронно с вариациями среднего рабочего магнитного поля  $B_0$ . В результате мы должны получить автоматическое поддержание резонансных условий для нейтронов в условиях нестабильного (из-за вариаций земного магнитного поля, промышленных помех, нестабильности тока в соленоиде, создающем  $B_0$ , собственного шума экрана и т.д.) рабочего магнитного поля. Т.е. в каждый момент времени (для любого текущего значения  $B_0$ ) частота осциллирующего поля в спектрометре будет равна ларморовской частоте прецессии нейтронов. Преимуществом такой многоканальной системы стабилизации является большая точность стабилизации, обусловленная ее исключительно высоким быстродействием (в отличие от часто применяемых стабилизаторов магнитного поля) и применением высокочувствительных квантовых магнитометров самогенерирующего типа.

Настоящая работа посвящена экспериментальному определению уровня стабильности, которого можно достичь в ЭДМ-спектрометре при использовании многоканальной системы стабилизации магнитного резонанса. С этой целью была построена модель, состоящая из магнитной экранированной системы, обеспечивающей создание рабочего магнитного поля, пяти цезиевых магнитометров, 5-канального частотомера, необходимого для точного определения выходных частот магнитометров, а также соответствующего программного обеспечения для обработки данных измерений.

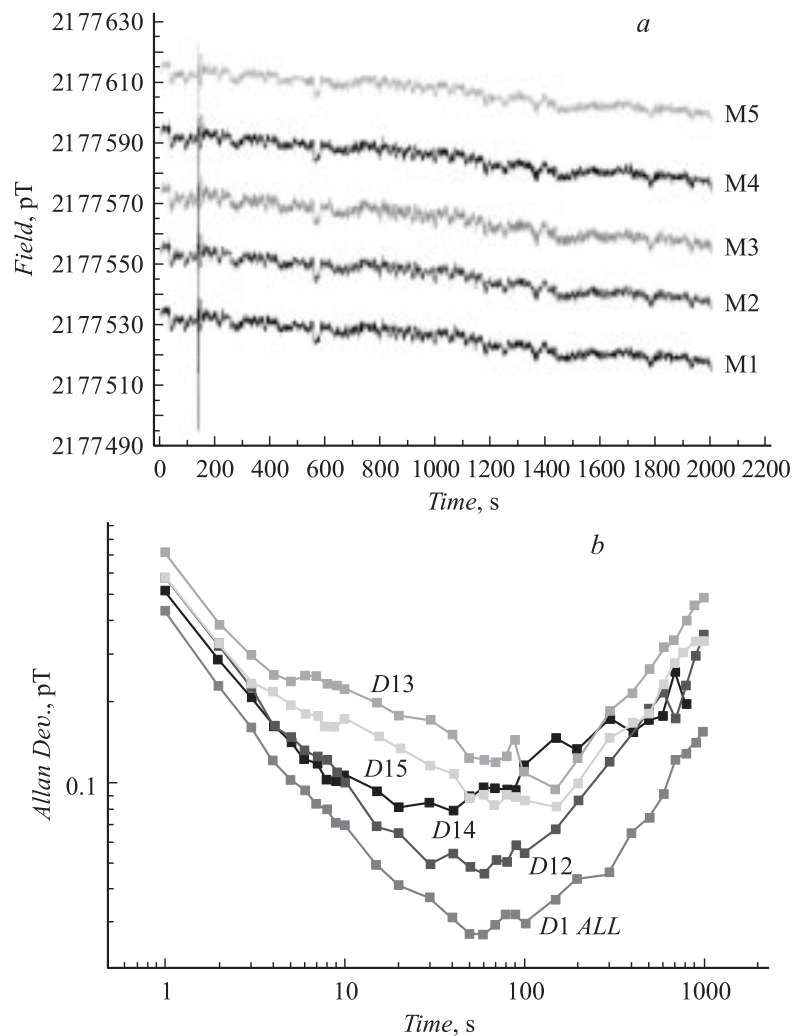
Магнитная система представляла собой четырехслойный цилиндрический пермаллоевый экран с размещенным внутри соленоидом и корректирующими катушками для создания однородного рабочего поля спектрометра  $B_0 = 2000$  нТ. Изготовленный (в масштабе 1:2 по отношению к экрану создаваемого ЭДМ-спектрометра) экран имел собственный коэффициент экранирования  $K_{axial} \sim 100$ ,  $K_{transv} \sim 1500$ . Оба коэффициента увеличивались в 50 раз при применении „shaking“-методики [5].

Размеры слоев были следующими:  $d_{1,2,3,4} = 0.61, 0.75, 0.85; 0.95$ ,  $l_{1,2,3,4} = 1.3, 1.4, 1.5, 1.6$ , где  $d$  и  $l$  — соответственно длина и диаметр, выраженные в метрах. Для питания катушек были разработаны два малощумящих источника постоянного тока с относительной стабильностью  $\sim 10^{-7}$  — для соленоида и  $\sim 10^{-6}$  — для корректирующих катушек. Для моделирования работы системы стабилизации были изготовлены пять цезиевых магнитометров [6] с расчетной чувствительностью  $\sim 1$  фТ за время измерений 100 с, которые были размещены внутри магнитной системы (см. рис. 1). При этом магнитометр, находящийся в центре экрана, служил для измерения магнитного поля в месте расположения одной из камер удержания УХН, а остальные четыре магнитометра, расположенные равномерно по окружности ( $d = 30$  см) вокруг центрального, регистрировали магнитное поле по периметру этой камеры. С помощью этой модели были проведены многочисленные долговременные (до суток и более) записи магнитного поля в экране, находящемся в экспериментальном зале. Эксперименты с моделью системы стабилизации нейтронного магнитного резонанса проводились сначала в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ), расположенном в г. Гатчина, а затем в Paul-Scherrer Institute (PSI), расположенном в п. Villigen (Швейцария). Затем, по данным магнитометрических измерений, полученных с помощью пяти магнитометров, вычислялась разность между усредненным значением частот периферийных четырех



**Рис. 1.** Упрощенная схема экранированной пятиканальной магнитометрической модели системы стабилизации резонансных условий. М1–М5 — цезиевые магнитометры, 1 — магнитный экран, 2 — пятиканальный частотомер, 3 — компьютер.

магнитометров (следовательно, и магнитных полей  $B$ , т. к.  $f = \gamma_{Cs}/2\pi B$ , где  $\gamma_{Cs}/2\pi = 3.5 \text{ Hz/nT}$  — гиромагнитное отношение для цезия) и частотой центрального магнитометра:  $\delta f = (f_2 + f_3 + f_4 + f_5)/4 - f_1$ . Такая методика определения точности стабилизации была вызвана тем, что в планируемом эксперименте [1] частота магнитного резонанса УХН формируется путем усреднения частот 16 магнитометров с последующим делением этой средней частоты  $\langle f_{Cs} \rangle$  на величину  $K = \gamma_{Cs}/\gamma_n$  (где  $\gamma_n$  — гиромагнитное отношение для нейтрона). Для оценки предельных возможностей (собственного шума) системы стабилизации магнитометрические исследования внутри экрана проводились специально в магнитно спокойное (обычно ночное) время. На рис. 2, *a* представлен пример такой записи, полученной с помощью пяти магнитометров. На рис. 2, *b* представлены результаты обработки



**Рис. 2.** *a* — фрагмент временной записи индукции магнитного поля внутри экрана, полученной с помощью цезиевых магнитометров. *b* — зависимость аллановской девиации разности показаний магнитометров (центрального и остальных)  $\sigma_a(B_1 - B_{2,3,4,5})$ , а также величины, характеризующей степень достигнутой стабилизации резонансных условий,  $\sigma_a(B_1 - (B_2 + B_3 + B_4 + B_5)/4)$  от времени усреднения.

временных зависимостей с целью определения аллановской девиации [7] разности показаний магнитометров ( $D12, 13, 14, 15$ )  $\sigma_a(B_1 - B_{2,3,4,5})$  и аллановской девиации величины ( $D1ALL$ ), характеризующей разницу между показаниями центрального магнитометра и средней величиной для показаний других магнитометров  $\sigma_a(B_1 - \Sigma B_{2,3,4,5}/4)$ , которая по сути дела и является мерой достигнутого уровня стабилизации. Как видно из этого рисунка, абсолютная величина эквивалентной стабильности магнитного поля, полученная в ходе модельного эксперимента, составляет 30 фТ при времени усреднения 100 с или в относительных единицах:  $\delta B/B_0 = 1.5 \cdot 10^{-8}$ . Таким образом, в ходе изучения описанной модели была продемонстрирована высокая потенциальная эффективность выбранного способа стабилизации магнитного резонанса УХН, полностью удовлетворяющая задаче измерения ЭДМ нейтрона с помощью изготавливаемого в настоящее время мультикамерного спектрометра.

Работа была выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 04-02-17440 и 05-02-17826), ОФН РАН (программа „Оптическая спектроскопия и стандарты частоты“), INTAS (грант 01-0765).

Авторы статьи выражают благодарность руководству Paul-Scherrer Institute (Швейцария) R. Eichler, H. Gaggeler — за предоставленную возможность проведения исследований, а также сотрудникам этого института R. Henneck, M. Daum, A. Pichmaier, K. Kohlik, K. Kirch, S. Ritt за помощь в работе.

## Список литературы

- [1] *Aleksandrov E., Balabas M., Borisov Yu. et al.* The multi-chamber EDM spectrometer. Status 2005. См.: <http://nrd.pnpi.spb.ru/LabSereb/edm2005.pdf>.
- [2] *Smith K.F., Crampin N., Pendlebury J.M. et al.* // *Phys. Lett. B.* 1990. V. 234. P. 191.
- [3] *Harris P.G., Baker C.A., Green K. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 1999. V. 82. N 5. P. 904.
- [4] *Borisov Yu.V., Ivanov S.N., Lobashev V.M. et al.* // *Nucl. Instr. and Meth. A.* 1995. V. 357. P. 115.
- [5] *Choen D.* // *Appl. Phys. Lett.* 1967. V. 10. N 3. P. 67.
- [6] *Александров Е.Б., Балабас М.В., Дмитриев С.П. и др.* // *Письма в ЖТФ.* 2006. Т. 32. № 14. С. 58.
- [7] *Allan D.W.* // *Proc. IEEE.* 1966. V. 54. N 2. P. 221.