

15

Новая магнитная ловушка из постоянных магнитов для хранения ультрахолодных нейтронов

© Б.А. Базаров, В.Ф. Ежов, Н.А. Коврижных, В.Л. Рябов,
А.З. Андреев, А.Г. Глушков, В.А. Князьков, Г.Б. Крыгин

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН,
НИЦ „Курчатовский институт“, Гатчина
E-mail: krygingb@yandex.ru

Поступило в Редакцию 27 января 2016 г.

Описана конструкция новой магнитной ловушки из постоянных магнитов, предназначенной для хранения ультрахолодных нейтронов для проведения эксперимента по измерению времени жизни нейтрона. В предложенном варианте конструкции особое внимание уделено системе запираения нейтронов в ловушке для их хранения. Оптимизация данной системы позволит поднять запирающее в ловушке нейтроны магнитное поле, тем самым даст возможность значительно увеличить число нейтронов, хранящихся в ее объеме, и соответственно повысить статистическую точность измерения времени жизни нейтрона.

Прецизионное измерение времени жизни свободного нейтрона в экспериментах при низких энергиях имеет принципиальное значение для физики элементарных частиц и космологии. Основной систематический эффект в экспериментах по измерению времени жизни нейтрона методом хранения ультрахолодных нейтронов (УХН) в материальных ловушках обусловлен наличием так называемых аномальных потерь нейтронов при их соударениях со стенками сосуда. Магнитное удержание нейтронов позволяет исключить соударение нейтронов со стенками.

В магнитной ловушке УХН определенной поляризации отражаются магнитным барьером и не испытывают соударений со стенками. Таким образом, в данной системе возможность аномальных потерь УХН при отражении от стенки исключена принципиально. Именно это обстоятельство и стало основным стимулом при создании магнитных ловушек для удержания УХН.

В Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова (далее ПИЯФ) в 2001 г. было предложено создать магнитную ловушку для хранения УХН следующей конструкции: стенки ловушки были образованы двадцатиполюсниками из постоянных магнитов, чередующихся с концентраторами магнитного поля; магниты намагничены в горизонтальной плоскости, причем намагниченность соседних магнитов противоположная; магнитные концентраторы изготавливались из пермендюра (сплав 49КФ) [1]. Впервые созданная конструкция с использованием концентраторов позволила достичь величины магнитного поля у стенки ловушки порядка 1 Т.

Основным достоинством данной магнитной системы является то, что в отличие от материальной ловушки здесь имеется возможность регистрации потерь. Главным источником потерь нейтронов при их хранении в магнитной ловушке является неадиабатический переворот магнитного момента нейтрона относительно направления магнитного поля. При этом магнитный барьер становится для таких нейтронов потенциальной ямой, и нейтрон при движении в нем ускоряется. Однако если стенки ловушки покрыты материалом, способным отразить эти ускоренные нейтроны (например, фомблином), то они будут продолжать храниться в магнитной ловушке, как в материальной. После нескольких соударений со стенками такой нейтрон соударится с магнитным барьером, перекрывающим нейтроновод, и проникнет в него. Если к нейтроноводу подсоединен детектор УХН, то такой нейтрон будет им зарегистрирован. Таким образом, появляется уникальная возможность регистрации потерь в процессе хранения УХН в магнитной ловушке.

Первый вариант магнитной ловушки (рис. 1) был создан в ПИЯФ в 2002–2003 гг. При использовании ловушки высотой всего 0.15 м и объемом $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ погрешность измерения времени жизни нейтрона составила 16 с за 6 дней, а время хранения нейтронов было близко к их времени жизни. Увеличение высоты ловушки до 0.5 м в 2004 г. позволило снизить погрешность до 7.7 с за то же время. Наконец, в

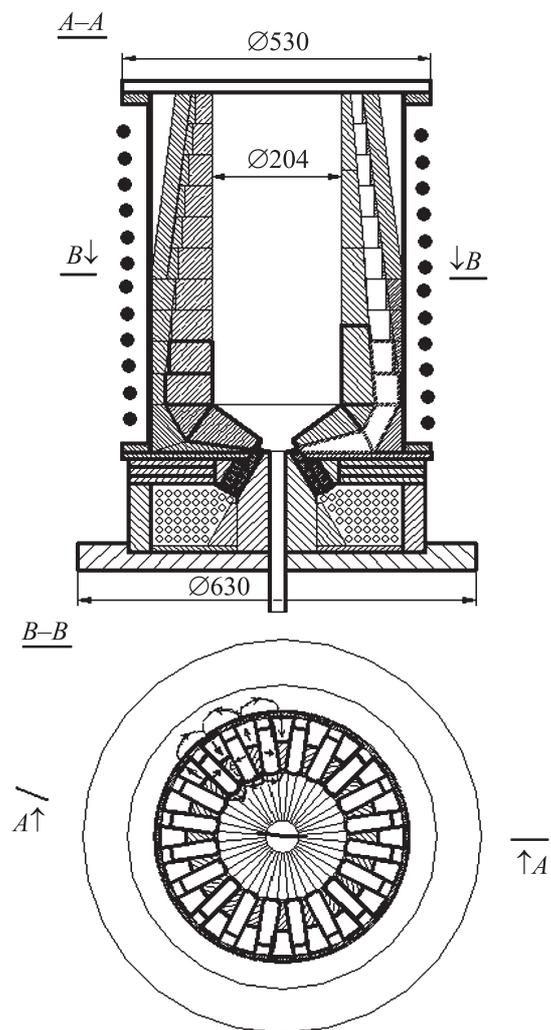


Рис. 1. Вертикальное (сверху) и горизонтальное (снизу) сечения магнитной системы первой магнитной ловушки.

2007 г. был завершен набор статистики, проведены измерения эффективности сбора деполаризованных нейтронов и исследованы возможные систематические эффекты. В результате этого впервые в мире получено значение времени жизни нейтрона путем использования магнитного хранения УХН в магнитной ловушке. Оно составило 878.3 ± 1.9 s [2–4].

Проведенные исследования на первой ловушке выявили недостатки и показали направления улучшения конструкции магнитной ловушки для повышения чувствительности эксперимента. Кроме очевидного увеличения объема ловушки, основное внимание было уделено магнитному затвору, который является по-своему уникальной системой, и его конструкция зависит как от конструкции ловушки, так и от конкретных физических задач данного эксперимента.

Очевидными требованиями к магнитному затвору являются его способность перекрывать проходное сечение нейтронотода при хранении нейтронов в ловушке и быстро открывать его при ее наполнении и опорожнении. Однако желательно, чтобы при хранении нейтронов в ловушке барьер оставался прозрачным как для нейтронов противоположной поляризации, которые могут появляться в процессе хранения УХН при неадиабатическом перевороте спина нейтрона относительно направления магнитного поля, так и для нейтронов, энергия которых превышает высоту магнитного барьера. Выполнение этих требований дает уникальные возможности при проведении экспериментов по измерению времени жизни нейтрона. Прозрачный магнитный барьер позволяет также очистить с высокой эффективностью спектр хранящихся УХН от нейтронов, энергия которых превышает энергию магнитного барьера. При этом количество таких нейтронов также будет зарегистрировано. Из вышесказанного следует, что для экспериментов по измерению времени жизни нейтрона необходим магнитный барьер в виде градиента магнитного поля, перекрывающего вход впускного нейтронотода, и величиной магнитного поля на уровне отражающего нейтроны поля стенок ловушки.

В ПИЯФ был разработан магнитный затвор, удовлетворяющий указанным требованиям. В нем использована комбинация магнитных полей от постоянных магнитов и соленоидальной обмотки. Такая конструкция позволяет добиться минимальной потребляемой мощности в обмотке соленоида.

Кроме того, ярмо магнитной системы находится практически в насыщении, а следовательно, влияние флуктуаций тока в соленоиде

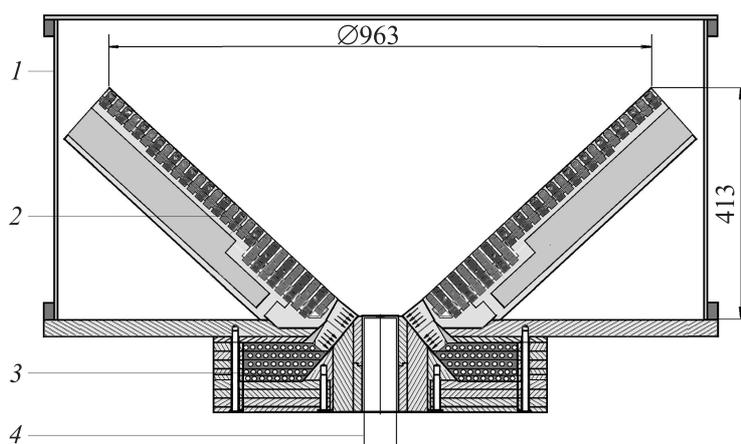


Рис. 2. Вертикальное сечение экспериментальной установки: 1 — вакуумная камера; 2 — магнитная система; 3 — соленоид затвора; 4 — входной нейтроновод.

практически не вызывает флуктуаций в величине запирающего магнитного поля, которые могут вызывать резонансный переворот магнитного момента относительно направления магнитного поля при хранении УХН в ловушке.

Затвор для первой ловушки был изготовлен и использовался в эксперименте, однако у него оказался недостаток, обусловленный интерференцией магнитного поля затвора и мультипольного (двадцатипольного) магнитного поля от стенок ловушки. Интерференция приводит к тому, что при сложении одинаковых по величине полей затвора и стенок запирающее поле в нейтроноводе в десяти случаях увеличивается вдвое и в десяти падает до нуля. Для устранения нулей магнитное поле затвора было снижено до 0.45 Т, и соответственно была снижена потенциальная возможность ловушки хранить нейтроны до энергии, соответствующей величине поля стенок ловушки 1 Т.

При проектировании новой магнитной ловушки была принципиально изменена геометрия магнитных полей стенок ловушки таким образом, что магнитное поле затвора стало одним из полюсов их магнитной системы. Это было достигнуто переходом от горизонтального

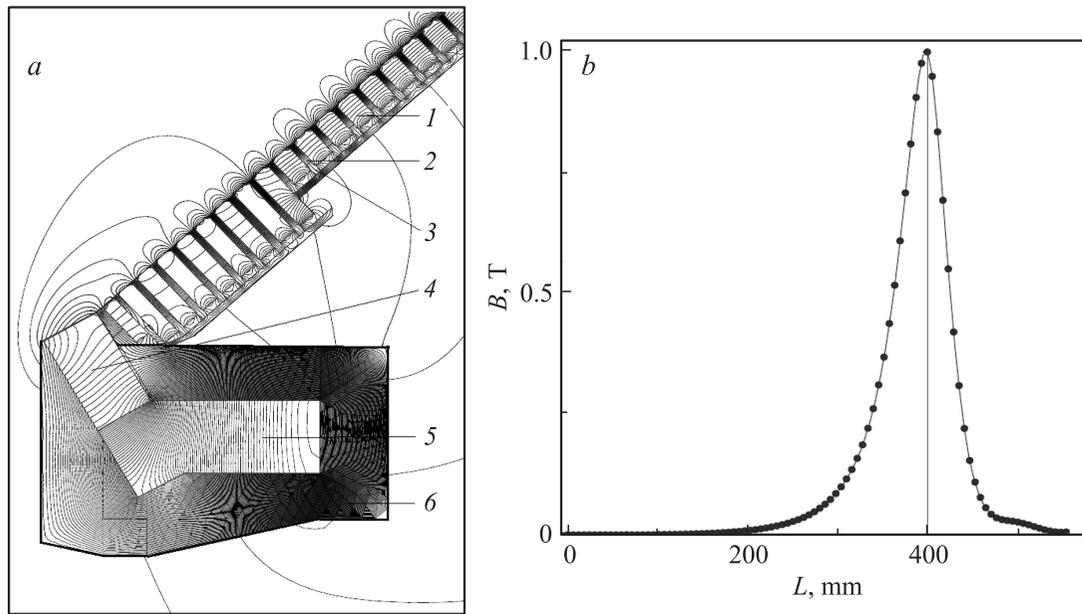


Рис. 3. Расчет магнитного поля. *a* — поперечный разрез магнитной системы новой ловушки, показаны силовые линии магнитного поля: 1 — основные магниты; 2 — полюсные наконечники; 3 — подпирющие магниты; 4 — магниты затвора; 5 — соленоид затвора; 6 — ядро магнитной системы затвора. *b* — распределение магнитного поля вдоль центральной оси затвора. $L = 400$ mm соответствует уровню „горловины“ ловушки.

расположения магнитов (рис. 1), создающих отражающий нейтроны градиент магнитного поля, к расположению магнитов на поверхности конуса с отражающим градиентом магнитного поля от образующей конуса (рис. 2). Ловушка при этом по своей форме напоминает вазу.

Расчет магнитного поля выполнен с помощью интегрированной системы программ ELCAT, позволяющей решать плоские и осесимметричные задачи магнитостатики методом конечных элементов.

Расчеты новой магнитной системы показали, что нежелательная интерференция магнитных полей затвора и ловушки полностью исключена. Это позволяет поднять величину запирающего магнитного поля в затворе ловушки до возможного максимума энергии хранимых нейтронов (соответствующей 1 Т) и соответственно увеличить энергию хранившихся нейтронов вдвое.

Производилась многократная вариация различных геометрий ловушки. Главное требование при оптимизации конструкции магнитной системы состояло в получении величины магнитного поля на поверхности стенок ловушки и в затворе на уровне 1 Т при недопустимости уменьшения величины поля в области интерференции полей стенок ловушки и затвора. Для оптимизации количества постоянных магнитов применялась конструкция, в которой магниты чередуются с полюсными наконечниками (изготовленными из пермендюра), под которыми располагаются подпирающие магниты. Распределение силовых линий затвора и стенок ловушки приведено на рис. 3, *a*.

Основной параметр затвора — распределение магнитного поля в „горловине“ ловушки. Оптимизацией конструкции затвора удалось добиться величины вертикальной составляющей магнитной индукции на уровне 1 Т при плотности тока в соленоиде затвора 6.3 A/mm^2 , что согласовано с имеющимся источником тока 500 А, а при отключении тока в соленоиде — близко к нулевому значению. На рис. 3, *b* приводится график величины магнитной индукции (B) вдоль вертикальной оси ловушки. Таким образом, проведенные расчеты подтверждают правильность выбора конструкции новой магнитной ловушки.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность Н.Н. Дмитриеву за участие в создании и сборке магнитной ловушки.

Данная работа выполнена в рамках проведения эксперимента по измерению времени жизни свободного нейтрона в магнитной ловушке из постоянных магнитов и поддержана грантом РФФИ № 13-02-00402.

Список литературы

- [1] *Ежов В.Ф., Базаров Б.А., Гельтенборт П.* и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 24. С. 64–70.
- [2] *Ezhov V.F.* et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2009. V. 611. N 2–3. P. 167.
- [3] *Ежов В.Ф., Андреев А.З., Ван Ж.* и др. Измерение времени жизни нейтрона с ультрахолодными нейтронами при их хранении в магнитно-гравитационной ловушке. Препринт ПИЯФ, 2964. Гатчина, 2014. 11 с.
- [4] *Ezhov V.F., Andreev A.Z., Van G.* et al. Measurement of the Neutron Lifetime with Ultra-Cold Neutrons Stored in a Magneto-Gravitational Trap. <http://arxiv.org/abs/1412.7434>