

## КОНЦЕПЦИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СПИН-ФЛИППЕРА – ЗАМЕДЛИТЕЛЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИСТОЧНИКА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ НА ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ

А. А. Попов<sup>1,2\*</sup>, К. С. Осипенко<sup>2</sup>, В. И. Щербаков<sup>3</sup>, А. И. Франк<sup>1</sup>, Г. В. Кулин<sup>1</sup>,  
В. А. Курылёв<sup>1,4</sup>, Д. А. Коломенцева<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Объединённый Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup>ГУ «Дубна», Дубна, Россия

<sup>3</sup>SuperOx, Москва, Россия

<sup>4</sup>НИИЯФ МГУ, Дубна, Россия

\* E-mail: [aapopov@jinr.ru](mailto:aapopov@jinr.ru)

Несколько ключевых обстоятельств легли в основу концепции источника ультрахолодных нейтронов (УХН) на импульсном реакторе периодического действия. Во-первых, осуществление идеи эффективного импульсного накопления УХН [1] в ловушке позволит получить более высокую плотность УХН по сравнению со усреднённым по времени потоком, а в лучшем случае, сравнимую с плотностью потока в импульсе. Во-вторых, как показано в [2], указанная выше идея может быть осуществлена при замедлении очень холодных нейтронов локальным замедляющим устройством. В качестве последнего предлагается использовать градиентный спин-флиппер [3],[4] в значительных магнитных полях порядка 18 Тл.

Градиентный спин-флиппер способен перевернуть спин нейтронов достаточно широкого диапазона спектра скоростей. Такой процесс осуществляется за счет действия комбинации стационарного градиентного поля и высокочастотного (ВЧ) поля, вращающегося в плоскости, ортогональной направлению стационарного поля. Градиент стационарного поля и амплитуда ВЧ-поля должны слабо меняться в достаточно протяженной области пространства вблизи резонансной области – области переворота спина. Резонансная область характеризуется совпадением угловой скорости вращения ВЧ поля с частотой прецессии Лармора в стационарном поле  $\omega_L = \gamma B$ .

Вероятность переворота спина в градиентном флиппере определяется параметром адиабатичности  $k$  в резонансной области соотношением  $k = \gamma B_1 / (v |\partial B_0 / \partial z|)$ , где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение для нейтрона,  $B_1$  – амплитуда ВЧ поля,  $v$  – скорость нейтрона,  $\partial B_0 / \partial z$  – градиент стационарного поля вдоль основного направления следования нейтронного пучка. При достаточной протяженности области переворота спина и  $k > 4$ , вероятность переворота спина близка 1 с точностью до процентов. Изменение энергии определяется соотношением  $\Delta E = 2\mu B$ , где  $\mu$  – магнитный момент нейтрона,  $B$  – резонансное поле, ларморовская частота прецессии нейтрона в котором  $\omega_L$  равна частоте вращения  $\Omega$  ВЧ поля.

Магнитная система должна быть обеспечить высокую эффективность переворота спина при максимально возможной величине передаваемой энергии. При этом дисперсия времен замедления нейтронов должна быть наименьшей. Отсюда следует, что области нарастания и спада поля должны быть по возможности короткими, а для того, чтобы параметр адиабатичности  $k$  был достаточно большим, они должны быть разделены областью с относительно малым градиентом поля  $\partial B_0 / \partial z$ .

Совместно с компанией изготовителем “СуперОкс” разрабатывается эскизный проект сверхпроводящего стационарного магнита градиентного спин-флиппера. Магнит

будет составлен из набора сверхпроводящих соленоидов с различным внутренним радиусом. Сверхпроводящие соленоиды будут помещены в криостат с теплой областью диаметром 15 см, в которую сможет поместиться резонатор и нейтроновод. Вращающееся ВЧ поле планируется генерировать с помощью резонатора типа «птичья клетка».

Поле в области резонанса имеет величину около 18 Тл, что позволяет замедлять нейтроны со скоростей 20 м/с до 5 м/с. Продольная компонента градиента стационарного поля  $\partial B_0 / \partial z$  должна находиться в пределах от 1 Тл/м до 1.5 Тл/м. Длина области переворота спина, в которой требуется выдержать указанный продольный градиент должна быть не менее 5 см, а поперечные размеры этой области ограничены окружностью с радиусом 4 см. Радиальная неоднородность поля  $B_0$  в области переворота спина должна быть менее 12 мТл. ВЧ поле должно вращаться с постоянной частотой  $f = \Omega / (2\pi) \approx 520$  МГц и иметь амплитуду  $B_1 > 0.7$  мТл, сохраняющуюся во всей области переворота спина.

Монте-Карло программа расчета движения нейтрона в нейтроноводе, помещенного в центральный канал соленоидов, оперировала с картой магнитного поля флиппера, полученной в отдельном расчете и заданной на трехмерной сетке с шагом 1 мм. Сечение нейтроновода полагалось прямоугольным с размером сторон 80 мм и граничной скоростью 4 м/с.

Рассчитывалось время прохождения практически всей области магнитного поля длиной 1380 мм нейтронами, скорость которых вдоль оси канала лежала в диапазоне от 20.3 до 21.5 м/с. Предполагалось, что в центре области спин нейтрона меняется, так что нейтрон замедляется на всем пути в области магнитного поля. Конечные скорости нейтронов после прохождения флиппера лежали в интервале от 3.5 до 5 м/с. Величина поперечной компоненты скорости при этом практически не менялась и ограничивалась величиной граничной скорости нейтроновода.

Разброс времен замедления в системе составляет 14 мс. Для нейтронов с продольными скоростями в узком диапазоне скоростей 4 – 4.01 м/с разброс времен замедления порядка 1.5 мс.

Результаты работы имеют важное практическое значение для разработки принципиально нового источника УХН. Полученный результат дает основание надеяться, что идея создания источника УХН с импульсным накоплением ловушки, основанная на использовании нестационарного замедления нейтронов является реализуемой.

1. Ф. Л. Шапиро, ЭЧАЯ **2**, 4, 975 (1972).
2. А. И. Франк, Г. В. Кулин, Н. В. Реброва, М. А. Захаров, Письма в ЭЧАЯ **20**, 4(249), 669–675 (2023).
3. V. I. Luschnikov, Yu. V. Taran, Nucl. Instr. Meth. **228**, 159 (1984).
4. S. V. Grigoriev, A. I. Okorokov, V. V. Runov, Nucl. Instr. Meth. A **384**, 451 (1997).