

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



20/v-74

G-604

P3 - 7729

1951/2-74

В.В.Голиков, Ю.В.Таран

ВОЗМОЖНЫЙ СПОСОБ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ ИЗ РЕАКТОРА
И ИХ НАКОПЛЕНИЯ

1974

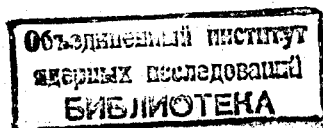
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

РЗ - 7729

В.В.Голиков, Ю.В.Таран

ВОЗМОЖНЫЙ СПОСОБ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ ИЗ РЕАКТОРА
И ИХ НАКОПЛЕНИЯ

Направлено в ПТЭ



Голиков В.В., Таран Ю.В.

РЗ - 7729

Возможный способ извлечения ультрахолодных нейтронов из реактора и их накопления

Предлагается способ извлечения ультрахолодных нейтронов из замедлителя реактора, имеющего граничную скорость, сравнимую или большую граничной скорости транспортного нейтронного канала, с помощью наложения магнитного поля необходимой напряженности на замедлитель. Способ заключается в замедлении нейтронов с антипараллельной относительно направления магнитного поля проекцией спина в спадающем вне замедлителя магнитном поле и дальнейшей их транспортировке обычным нейтронным каналом. На основе этого способа предлагается принципиальная конструкция затвора для накопителей ультрахолодных нейтронов в сочетании с импульсными или стационарными реакторами.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.

Дубна, 1974

Golikov V.V., Taran Yu.V.

РЗ - 7729

A Possible Method for Extraction of Ultra-Cold Neutrons from the Reactor and Their Storage

A method is suggested for extraction of ultra-cold neutrons from the reactor moderator with the cutoff velocity comparable or greater than that for the transporting neutron guide tube. The neutrons are extracted by means of a magnetic field of necessary intensity superimposed on the moderator. The method consists in delaying the neutrons (with antiparallel spin projection, with respect to a magnetic field direction) in a decreasing, out of the moderator, magnetic field and in their further transporting by conventional neutron guide tube. On the basis of this method it is suggested a principal construction of a lock for the ultra-cold neutron storage device used together with the pulse and stationary reactors.

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna, 1974

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе /1/ дан обзор используемых в экспериментальной практике способов получения ультрахолодных нейтронов /УХН/. Наибольшее распространение получили способы непосредственного извлечения УХН из замедлителя реактора и дальнейшая их транспортировка с помощью горизонтального, наклонного или вертикального нейтронных каналов к экспериментальной установке. Поскольку из замедлителя практически могут выходить только УХН, образовавшиеся в поверхностном слое толщиной порядка средней длины свободного пробега УХН, то этот слой /так называемый конвертор УХН/ обычно механически отделяется от основной массы замедлителя. Для горизонтального транспортного нейтронного канала граничная скорость $v_{гр}^k$ должна быть больше граничной скорости $v_{гр}^k$ конвертора /или его оболочки/. Наиболее подходящими материалами для таких нейтронных каналов являются медь / $v_{гр} = 5,7$ м/сек/, никель /6,7 м/сек/, бериллий /6,8 м/сек/, графит /6,1 м/сек/, стекла /4 - 4,5 м/сек/ и некоторые другие, довольно низкие граничные скорости которых значительно сужают круг подходящих материалов для конверторов. С другой стороны, материал для конвертора должен удовлетворять условию $\sigma_c \ll \sigma_{нагр}$, где σ_c и $\sigma_{нагр}$ - сечения захвата и нагрева УХН, соответственно. Кроме того, так как конвертор находится вблизи активной зоны реактора, к нему предъявляется требование повышенной радиационной стойкости. Все эти ограничения привели к тому, что на горизонтальных каналах стационарных реакторов в качестве

конверторов были использованы и исследованы всего четыре вещества /1/: алюминий / $v_{гр}^k = 3,2$ м/сек/, магний /3,36 м/сек/, гидрид циркония и вода /в тонком алюминиевом сосуде/. Такие же хорошие конверторы, как тяжелая вода /5,5 м/сек/, бериллий, графит, из-за высокой граничной скорости могут быть использованы только на вертикальных каналах.

Нами предлагается новый способ извлечения УХН из реактора применительно к горизонтальным транспортным нейтроноводам, основанный на замедлении нейтронов в неоднородном магнитном поле. Ранее использование метода замедления было предложено в следующей модификации /2/. На пути нейтронов от реактора создается однородное магнитное поле H , спадающее по краям до нуля. При вхождении в поле на нейтроны с проекцией спина $S_n = +1/2$ на направление \vec{H} будет действовать тормозящая сила $F = \mu_n |\text{grad } \vec{H}|$, /где μ_n - магнитный момент нейтрона/, а на нейтроны с $S_n = -1/2$ - такая же ускоряющая сила.

Ускоренные нейтроны не представляют интереса, а на замедленные в центре области, занятой полем, где оно, по определению, однородно, нужно воздействовать резонансным радиочастотным полем, приводящим к переориентации спинов нейтронов. В этом случае на выходе из поля нейтроны, перевернувшие спины, будут испытывать дополнительное торможение. Пропуская нейтроны через ряд таких областей, можно получить пучок коллимированных поляризованных квазимонохроматических нейтронов достаточно малых энергий. Очевидно, что такой способ неприменим для канализированного потока нейтронного газа, как это имеет место при извлечении УХН из конвертора с помощью транспортного нейтроновода. Наша модификация метода замедления заключается в создании однородного магнитного поля на конверторе, так что оно вне конвертора спадает до нуля. В этом случае УХН с $S_n = -1/2$, родившиеся внутри конвертора, вылетая из него, будут замедляться в спадающем магнитном поле. При этом наличие у конвертора граничной скорости не играет роли, так как, создавая магнитное поле необходимой напряженности, можно заполнить замедлив-

шимися нейтронами внутри нейтроновода весь интервал скоростей от 0 до $v_{гр}^k$.

2. ТЕОРИЯ

Пусть имеется конвертор с эффективным потенциалом $U_k > 0$ /граничная скорость его равна $v_{гр}^k = \sqrt{\frac{2U_k}{m}}$, где

m - масса нейтрона/. Известно, что спектр потока УХН внутри конвертора соответствует начальному участку максвелловского спектра /см., например, /1//. Тогда поток УХН внутри конвертора со скоростью в интервале $(v_1, v_1 + dv_1)$ равен:

$$N(v_1) dv_1 \sim C v_1^3 dv_1. \quad /1/$$

После вылета из конвертора скорость нейтронов увеличится и станет равной $v_2 = \sqrt{v_1^2 + (v_{гр}^k)^2}$. Вне конвертора поток в интервале скоростей $(v_2, v_2 + dv_2)$ равен:

$$N'(v_2) dv_2 = N(v_1) D(v_1) dv_1, \quad /2/$$

где

$$D(v_1) = 1 - R(v_1), \quad /3/$$

$$R(v_1) = \left[\frac{1 - \sqrt{1 + \frac{(v_{гр}^k)^2}{v_1^2}}}{1 + \sqrt{1 + \frac{(v_{гр}^k)^2}{v_1^2}}} \right]^2 \quad /4/$$

- коэффициент отражения УХН при прохождении над границей раздела конвертор-вакуум /см., например, /3//. Выражая в уравнении /2-4/ v_1 через v_2 , получим:

$$N'(v_2)dv_2 = C \left[1 - \frac{(v_{гр}^k)^2}{v_2^2} \right] \left\{ 1 - \left[\frac{1 - \sqrt{1 - \frac{(v_{гр}^k)^2}{v_2^2}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{(v_{гр}^k)^2}{v_2^2}}} \right]^2 \right\} v_2^3 dv_2 \quad /5/$$

Отсюда видно, что спектр УХН, выходящий из конвертора, обрезан со стороны малых скоростей. На выходе из нейтроновода с граничной скоростью $v_{гр}^H$ спектр будет обрезан также со стороны высоких скоростей /рис. 1/.

Наложим теперь на конвертор магнитное поле H , такое, что в пределах толщины конвертора оно достаточно однородно, а за пределами спадает произвольно. Тогда для нейтронов с проекцией спина против поля $S_n = -1/2$ по закону сохранения энергии имеем:

$$v_3^2 = v_2^2 - \frac{2\mu_n H}{m} \quad /6/$$

где v_3 - скорость нейтрона на выходе из поля. Спектр УХН после выхода из поля равен:

$$N''(v_3)dv_3 = N'(v_2)dv_2 \quad /7/$$

Осуществив подстановку /6/ в /7/ и некоторые преобразования, получим:

$$N''(v_3) = C \left[1 + \frac{a^2}{v_3^2} - \frac{(v_{гр}^k)^2}{v_3^2} \right] \left\{ 1 - \left[\frac{1 + \frac{a^2}{v_3^2} - \frac{(v_{гр}^k)^2}{v_3^2}}{1 + \frac{a^2}{v_3^2}} \right]^2 \right\} v_3^3$$

$$1 + \sqrt{\frac{1 + \frac{a^2}{v_3^2} - \frac{(v_{гр}^k)^2}{v_3^2}}{1 + \frac{a^2}{v_3^2}}}$$

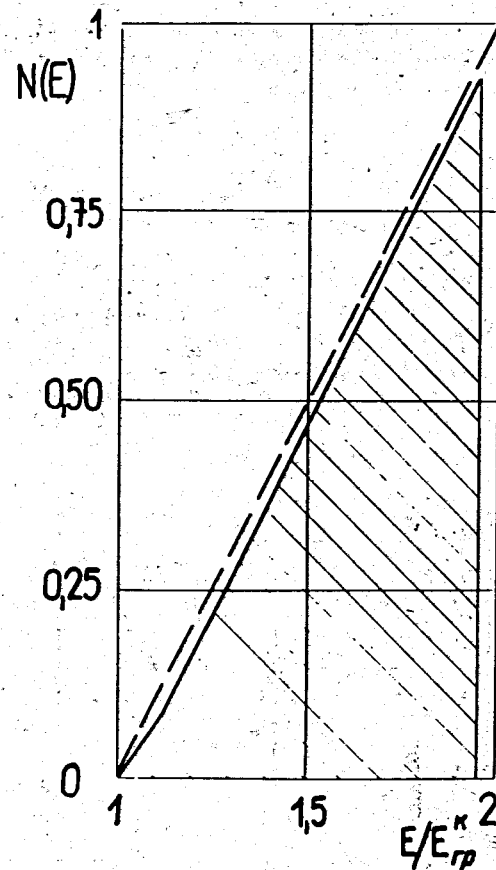


Рис. 1. Спектр УХН в энергетическом представлении $N(E)$ /произв. ед./ на выходе из нейтроновода с граничной энергией $E_{гр}^H$ /без учета поглощения в его стенках/, оборудованного конвертором с граничной энергией $E_{гр}^k$ /принято $E_{гр}^H / E_{гр}^k = 1,95$, что соответствует сочетанию конвертора в алюминиевой оболочке и стеклянного нейтроновода/. Пунктирная прямая соответствует неискаженному спектру EdE .

где введено обозначение $a^2 = \frac{2\mu_n H}{m}$. После прохождения поля нижняя граница спектра равна $[(v_{гр}^k)^2 - a^2]$. Для заполнения всего интервала скоростей от 0 до $v_{гр}^k$ требуется напряженность поля:

$$H_k = \frac{m (v_{гр}^k)^2}{2\mu_n} \quad /9/$$

Например, для тяжелой воды и бериллия $H_k \approx 27$ и 47 кэВ соответственно. Для того чтобы выяснить, насколько реальное поле должно быть близко к H_k , найдем интегральный поток УХН на выходе нейтроновода /без учета поглощения в его стенках/:

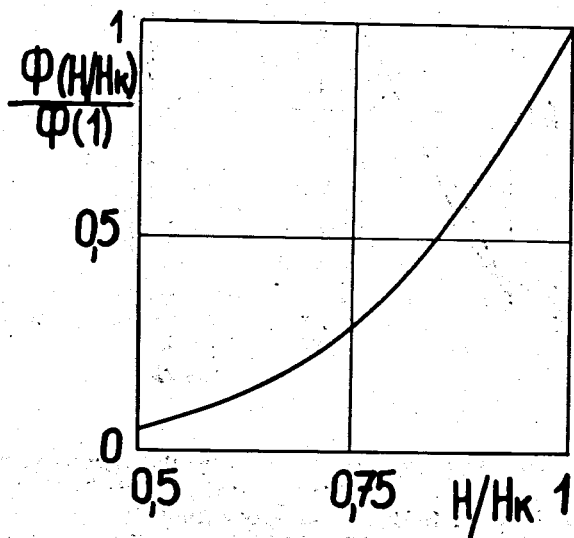


Рис. 2. Зависимость интегрального потока УХН $\Phi(H/H_k)$, нормированного на поток при $H = H_k$ на выходе из нейтроновода /без учета поглощения в его стенках/, оборудованного конвертором с граничной энергией, равной граничной энергии нейтроновода, от напряженности магнитного поля на конверторе /в единицах H_k /.

$$\Phi(a) = \int_{v_{гр}^k}^{v_{гр}^H} N''(v_3) dv_3 \quad /10/$$

Для частного случая $v_{гр}^H = v_{гр}^k$ /например, конвертор из D_2O , а нейтроновод из меди/ зависимость отношения $\Phi(H/H_k) / \Phi(1)$ приведена на рис. 2, из которого видно, что для заполнения интервала скоростей $(0, v_{гр}^k)$ на половину требуется поле $0,85H_k$.

В уравнениях /8/ и /10/ не учтена возможность квантовомеханического отражения от диффузного края магнитного потенциала $\mu_n H$, так как для расчета коэффициента отражения надо задавать форму этого потенциала, в общем случае неизвестного. Для реальной геометрии магнитного поля такой учет может быть сделан только численными методами.

3. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Выше было уже отмечено, что использование метода замедления позволяет использовать для получения УХН конверторы с высокой граничной скоростью, которые обладают хорошими качествами. Например, использование конвертора из тяжелой воды, охлажденного до температуры жидкого водорода, позволит увеличить выход УХН по сравнению с лучшим из используемых в настоящее время конвертором из гидрида циркония в 10-20 раз /4/.

Другая возможность заключается в создании более эффективного импульсного затвора для накопителей УХН. Как показано в /5,6/, использованием нейтронного затвора можно устранить отток УХН обратно через конвертор. В работе /5/ для этой цели предложен механический быстродействующий затвор. Однако он должен работать в сочетании с конвертором, у которого граничная скорость $v_{гр}^k$ должна быть значительно меньше граничной скорости вещества, из которого сделаны стенки накопителя или нейтроновода.

Предлагаемый нами способ извлечения УХН из конверторов с высокими значениями $v_{гр}^k$ одновременно позволяет осуществить магнитный нейтронный затвор. Схематическое изображение такого затвора приведено на рис. 3. Тепловые нейтроны из замедлителя реактора 1 падают на конвертор 3 и генерируют УХН внутри него. Для выпуска УХН из конвертора и пропускания их через окно накопителя 5, перекрытого тонкой пластиной 4 из материала с граничной скоростью, близкой к $v_{гр}^k$, включается электромагнит 2. После заполнения ловушки магнитное поле выключается и нейтроны оказываются запертыми в ней.

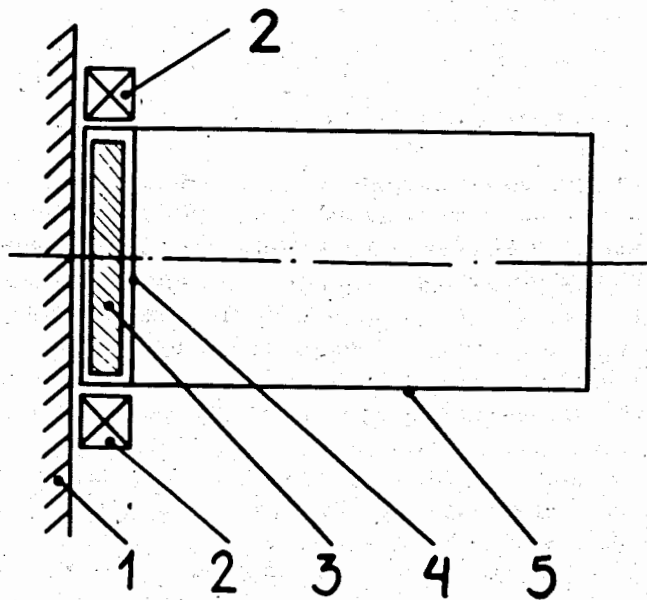


Рис. 3. Схематическое изображение накопителя УХН, оборудованного магнитным затвором: 1 - замедлитель реактора, 2 - электромагнит, 3 - конвертор, 4 - входное окно накопителя, 5 - накопитель.

Особенно эффективно использование такого затвора в сочетании с импульсными источниками нейтронов типа ИБР /7/, ИНН /8/, ТРИГА /9/. В этом случае плотность нейтронного газа в накопителе может быть в принципе увеличена на несколько порядков. Например, оценки показывают, что установка такого затвора в сочетании с конвертором из бериллия на реакторе ИБР-2 со средней мощностью 4 МВт /10/ делает этот реактор по выходу УХН почти эквивалентным высокопоточному реактору, например, типа RFH в Гренобле /11/.

Техническая осуществимость такого затвора не вызывает сомнений, хотя определенные трудности имеются. Наиболее существенной для эффективной работы затвора в импульсном режиме является проблема формирования достаточно резкого спада магнитного поля за входным окном накопителя, с тем, чтобы сократить время на замедление нейтронов. Другим ограничением является невозможность использования всех УХН, выходящих из конверторов с высокой граничной скоростью, так как глубина выхода УХН у материалов с малым сечением захвата становится довольно большой при охлаждении конвертора до низких температур /например, для тяжелой воды глубина выхода УХН при температуре $\sim 20^\circ\text{K}$ достигает полметра/.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После замедления УХН оказываются поляризованными и дальнейшие возможные процессы релаксации поляризации не служат помехой для функционирования накопителей или нейтронных труб, стенки которых сделаны из немагнитных материалов. В случае же необходимости использования поляризованных УХН для каких-либо экспериментов /например, для поиска электрического дипольного момента нейтрона на УХН /12// можно создать ведущее магнитное поле, чтобы исключить деполаризацию.

Таким образом, предлагаемая нами модификация метода замедления нейтронов в неоднородном магнитном поле позволяет:

а/ использовать в качестве конверторов УХН материалы с относительно высокой граничной скоростью, обладающие хорошими замедляющими свойствами и высокой радиационной стойкостью;

б/ осуществить магнитный нейтронный затвор с возможностью эффективного управления им электронными и электротехническими устройствами.

Авторы пользуются случаем, чтобы поблагодарить Ж.А.Козлова, В.И.Игнатовича и В.И.Лущикова за полезные дискуссии.

Литература

1. Ф.Л.Шапиро. Сообщение ОИЯИ РЗ-7135, Дубна, 1973.
2. Г.М.Драбкин, Р.А.Житников. ЖЭТФ, 38, 1013, 1960.
3. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Квантовая механика. Физматгиз, Москва, 1963.
4. В.В.Голиков и др. ЖЭТФ, 64, 73, 1973.
5. А.В.Антонов и др. Письма в ЖЭТФ, 10, 380, 1969.
6. Ф.Л.Шапиро. ЭЧАЯ, 2, вып. 4, 975, 1972...
7. Г.Е.Блохин и др. АЭ, 10, 437, 1961.
8. А.И.Смирнов и др. Препринт ИАЭ-1200, Москва, 1966.
9. A.P.Graff et al. Report-JA-7529, 1966.
10. В.Д.Ананьев и др. Препринт ОИЯИ 13-4392, Дубна, 1969.
11. J.Chatoux, W.Eisermann. Energie Nucleaire, II, 84, 1969.
12. Ю.В.Таран. Сообщения ОИЯИ РЗ-7147, РЗ-7149, Дубна, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 февраля 1974 года.