



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

РЗ-84-810

Ю.Н.Покотилловский

О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ИССЛЕДОВАНИЙ
С ОЧЕНЬ ХОЛОДНЫМИ НЕЙТРОНАМИ
НА ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ

1984

В последние годы усиливается интерес к исследованиям с применением очень холодных нейтронов /длина волны $> 10 \text{ \AA}$ /. Исследования на импульсных нейтронных источниках имеют свои особенности. В данной работе приводится анализ некоторых возможностей в применении к реактору ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ^{1/}. Во-первых, интервал между вспышками 200 мс допускает спектрометрию нейтронов при длине пролетной базы 10-20 м вплоть до скоростей 100-50 м/с /длина волны 40-80 \AA/. В настоящее время в мире нет и не строится периодических источников нейтронов со столь длительным интервалом между импульсами. Во-вторых, довольно большая длительность вспышки /~200 мкс/, не позволяя проводить с высоким энергетическим разрешением исследования в области тепловых нейтронов, тем не менее дает возможность получить хорошее абсолютное разрешение для медленных нейтронов ~1 мкэВ. В связи с этим здесь предлагается построить специальный нейтронный канал для вывода из реактора очень холодных нейтронов, и кратко очерчен круг возможных экспериментов.

1. НЕЙТРОНОВЫЙ КАНАЛ

Зеркальные нейтронные каналы, предназначенные для вывода тепловых нейтронов, непригодны для вывода холодных. Во-первых, длинный воздушный промежуток ~3 м между источником нейтронов ИБР-2 и входом в нейтронный канал сильно ослабляет поток холодных нейтронов /коэффициент ослабления ~3 для нейтронов с длиной волны 10 \AA и далее увеличивается пропорционально длине волны/. Во-вторых, большой радиус кривизны нейтронных каналов, оптимальный для вывода тепловых нейтронов, приводит к значительной примеси тепловых, запаздывающих и сателлитных. Это существенно из-за быстрого падения интенсивности холодных нейтронов $\sim \lambda^{-3}$. Например, при $\lambda = 30 \text{ \AA}$ примесь запаздывающих тепловых нейтронов может в несколько раз превысить поток холодных нейтронов /см. ниже/. Поэтому для вывода чистого пучка очень холодных нейтронов необходим нейтронный канал с малым радиусом кривизны и, возможно, с дополнительным поворотом относительно оси пучка. В качестве примера приведем результаты расчета интенсивности нейтронов из нейтронного канала со следующими параметрами: длина $L_0 = 10 \text{ м}$, ширина $a = 3 \text{ см}$, высота $h = 10 \text{ см}$, радиус кривизны $\rho = 300 \text{ м}$, покрытие - никель, $E_1 = 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ эВ}$ - граничная энергия никеля, $E^* = E_{12} \rho / 2a = 1 \text{ мэВ}$, $\lambda^* = 9 \text{ \AA}$. Интенсивность на выходе (н/см² · с)

$$F_0(E, L, \rho) dE = \Phi_0(E) 4\theta_k^2(E) R(E, L) T_0(E, \rho) T(E, L_0) = I_0 f(E) dE, \quad /1/$$

где $\Phi_0(E) = I_0 \frac{E}{E_T^2} e^{-E/E_T}$ - плотность потока в замедлителе в 1 стерадиан на единицу энергии нейтрона; E_T - температура нейтронного спектра; $4\theta_k^2(E) \doteq E/E^*$ - выигрыш за счет применения отражающего нейтронного канала, $E^* = 0,98 \text{ мкэВ}$; $R(E, L)$ - проигрыш из-за удаления L входа в нейтронный канал от замедлителя,

$$T_0(E, \rho) = \begin{cases} \frac{2}{3} \frac{E^*}{E} & - \text{ для } E > E^*, \\ \frac{2}{3} \frac{E^*}{E} \left[1 - \left(1 - \frac{E}{E^*} \right)^{3/2} \right] & - \text{ для } E < E^* - \text{ деформация} \end{cases} \quad /2/$$

спектра из-за изгиба нейтронвода^{6/}; $T(E, L_0)$ - потери из-за шероховатостей поверхности нейтронвода и других дефектов. Для вывода очень холодных нейтронов необходимо предельно сократить расстояние от замедлителя, при этом $R(E, L) \rightarrow 1$. Не будем сейчас учитывать и потери на шероховатостях, которые зависят от качества стекла и покрытия. Результаты испытания^{12/} модели $a = 1,7$ мм, $h = 170$ мм, $L_0 = 3$ м/ показали, что для $\lambda > 8$ Å потери составили 20%. В терминах длины волны имеем соответствующее^{11/} выражение

$$I_0 f(\lambda) = I_0 \frac{2\lambda^4}{\lambda^5} e^{-\lambda_T^2/\lambda^2} 4\theta_k^2(\lambda) T_0(\lambda), \quad /3/$$

где $4\theta_k^2(\lambda) = 1,2 \cdot 10^{-5} \lambda^2 / \lambda$ в Å/

$$T_0(\lambda) = \begin{cases} \frac{2}{3} \frac{\lambda^2}{\lambda^{*2}} & \text{при } \lambda < \lambda^* \\ \frac{2}{3} \frac{\lambda^2}{\lambda^{*2}} \left[1 - \left(1 - \frac{\lambda^2}{\lambda^{*2}} \right)^{3/2} \right] & \text{при } \lambda > \lambda^*. \end{cases} \quad /4/$$

Результаты расчета $f(E)$ и $f(\lambda)$ представлены в табл.1 и 2.

Таблица 1

Результаты расчета функции $f(E)$ /мкэВ⁻¹ /

E /мэВ/	0,05	0,1	0,2	0,4	0,7	1	2	4	10	20
$f(E) \cdot 10^{10}$	8,5	8,3	7,9	7,5	6,7	5,5	2,7	1,3	0,43	0,16

Таблица 2

Результаты расчета функции $f(\lambda)$ /Å⁻¹ /

λ /Å/	1	2	4	6	8	10	20	30	40	50
$f(\lambda) \cdot 10^8$	10	32	25	18	14	11	1,7	0,52	0,22	0,11

Поскольку на выходе прямого или слабоизогнутого нейтронвода интенсивность запаздывающих $\sim I_0 \eta / T$, где доля запаздывающих $\eta = 0,06$ и T - интервал между импульсами, то из приведенных формул следует отношение интенсивности запаздывающих и холодных, равно $E_{Tt}/2ET$, где t - время пролета. По данным предварительных измерений I_0 в гребенчатом водяном замедлителе^{13/} при 2 МВт составляет $5 \cdot 10^{11}$ н/см².с стерадиан.

Таким образом, без учета потерь в нейтронводе и без применения дополнительного холодного замедлителя можно получить на выходе из нейтронвода скорость счета в канале шириной 250 мкс / $\Delta\lambda \sim 0,1$ Å/ $8,5 \cdot 10^2$ н/см².с в области $\lambda = 20$ Å.

Интенсивность очень холодных нейтронов можно поднять еще в несколько раз /не имея в виду разработку жидководородного замедлителя/, если создать дополнительный охлаждающий конвертор /например жидкопропановый/ толщиной 2 см при температуре 100 К. Конструкция и техника безопасности работы с таким источником несравненно проще, чем с жидководородным замедлителем^{4,5/}.

II. ВОЗМОЖНЫЕ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1/ Измерение полных сечений в диапазоне длин волн 5-50 Å. Здесь, например, интерес представляют сжатые газы с точки зрения образования кластеров /ван-дер-ваальсовы молекулы/ и фазовые переходы.

2/ Квазиупругое рассеяние в диапазоне переданных импульсов $/10^{-3} \div 1/\text{А}^{-1}$ и переданных энергий вплоть до 1 мкэВ. Наиболее интересна область малых переданных импульсов. Основное преимущество здесь связано с возможностью применения корреляционного анализа на импульсном реакторе^{17/}. Если для исследования неупругих процессов этот метод не всегда приемлем /из-за увеличения статистической ошибки в присутствии мощных упругих пиков/, то для исследования упругого и квазиупругого рассеяния корреляционный анализ обладает большим преимуществом. В таком методе измеряется двумерная функция рассеяния в плоскости $(Q, \Delta\omega)$ даже при использовании одного детектора. Возможные области применения - это диффузионные движения в жидкостях, растворах, гидридах, сплавах, воде в полимерах; сегментная подвижность в полимерах и т.д., а кроме того критическое рассеяние при фазовых переходах. Отметим, что в простой модели диффузии, когда $\Delta\omega \sim Q^2$, выгодно уменьшить во времяпролетной методике энергию нейтронов, поскольку при фиксированных длительности вспышки и угле рассеяния квазиупругое уширение $\sim E$, а разрешение $\sim E^{3/2}$.

3/ Эксперименты, связанные с исследованием отражения нейтронов от поверхности раздела и плоскостей с градиентом коэффициента преломления для нейтронов /пленки, мембраны, ферромагнетики/. Работа с более медленными нейтронами, когда угол скольжения при наблюдении отражения $\sim \lambda$ увеличен, существенно легче, чем работа с тепловыми нейтронами.

4/ Дифракция на объектах с большим параметром решетки, на сверхрешетках и т.д.

5/ Поиск и исследование солитонных возбуждений в твердых телах, полимерах.

6/ Исследование ширин фоновых линий в некоторых объектах, например, в жидком гелии.

7/ Интерферометрия с фазовым разделением. Использование временной развертки и позиционного детектора сильнейшим образом

увеличивает статистическую точность, поскольку измеряется двумерная интерферограмма координата - длина волны.

8/ Исследование неупругих процессов с применением корреляционного анализа возможно в случаях, когда упругий пик существенно подавлен по той или иной причине. В ином случае необходима дополнительная монохроматизация в прямой или обратной геометрии. Здесь требуется более высокая интенсивность, хотя области применения крайне интересны. В частности, спектр низкочастотных возбуждений в полимерах /в том числе биологических/ исследуется, например, методом низкотемпературной калориметрии /интегральный способ/ ^{18/}; неупругое рассеяние даст спектр непосредственным образом. В этом же плане интересны и стеклообразные объекты с туннельными переходами, дающими линейную зависимость теплоемкости от температуры ^{19/}.

Для исследования неупругих процессов с высоким разрешением можно предложить вариант спектрометра обратной геометрии с кристаллическим фильтром из графита / $\lambda_{гр} = 6,69 \text{ \AA}$ / или висмута / $\lambda_{гр} = 6,5 \text{ \AA}$ /, и кристаллическим монохроматором из фторфлогопита ^{10/} / $d = 10 \text{ \AA}$ / для направления /001// перед детектором. Длина волны регистрируемых детектором нейтронов выбирается с таким расчетом, чтобы $\lambda/2 < \lambda_{гр}$ поликристаллического фильтра, т.е. высшие порядки отражения от кристалла-монохроматора отсекались бы фильтром. При длине пролетной базы 20 м достигаемое разрешение в области упругого пика составляет 10 мкэВ. Эффективная работа такого спектрометра требует существенного увеличения интенсивности холодных нейтронов.

Автор благодарен В.В.Голикову и Ю.М.Останевичу за замечания, В.М.Назарову за консультации и обсуждения, а также П.Пахеру и Л.Роште за интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В.Д. и др. ПТЭ, 1977, №5, с.17; ОИЯИ, P13-84-538, Дубна, 1984.
2. Корнилов В.В. и др. ОИЯИ, P13-80-496, Дубна, 1980.
3. Гундорин Н.А., Назаров В.М. ОИЯИ, P3-80-721, Дубна, 1980.
4. Землянов М.Г. и др. ПТЭ, 1973, №5, с.34; Nucl.Instr. and Meth., 1976, 136, p.425.
5. Galotto C. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1976, 134, p.369.
6. Meier-Leibnitz H., Springer T. Reactor Sci.Technol. (J.Nucl.Energy A/B), 1963, 17, p.217.
7. Kroo N. et al. IAEA, Neutron Inelastic Scattering. Vienna, 1972, p.763.
8. Мревлишвили Г.М. УФН, 1979, 128/2/, с.273.
9. Anderson P. Phil.Mag., 1972, 25, p.1.
10. Зеленюк Ф.М. и др. ПТЭ, 1973, №2, с.57.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 декабря 1984 года.

Покотилловский Ю.Н.

P3-84-810

Некоторые возможности исследований с очень холодными нейтронами на импульсных источниках

Кратко рассмотрены различные экспериментальные возможности при использовании очень холодных нейтронов / $\lambda > 5 \text{ \AA}$ / на импульсных нейтронных источниках. Рассчитан выход холодных нейтронов из кривого зеркального нейтронного новода с относительно малым радиусом кривизны /300 м/, установленного на неохлаждаемом замедлителе реактора ИБР-2. Отмечены возможные области применения спектроскопии очень холодных нейтронов. В частности, перспективными являются исследование квазиупругого рассеяния с использованием корреляционной спектроскопии на импульсном реакторе, "отражательная" спектроскопия для изучения одномерных структур, нейтронная интерферометрия с использованием позиционно-чувствительных детекторов. Предложен вариант спектрометра неупругого рассеяния очень холодных нейтронов с использованием кристалла фторфлогопита в качестве монохроматора.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Pokotilovskij Yu.N.

P3-84-810

Some Possibilities of Investigation with Very Cold Neutrons at Pulsed Sources

Various experimental possibilities of using very cold neutrons ($\lambda > 5 \text{ \AA}$) at pulsed neutron sources are briefly discussed. The outflow of cold neutron flux from curved mirror neutron guide with a relatively small radius of curvature (300 m) installed on a noncooled moderator of IBR-2 reactor is calculated. Possible regions of application of spectroscopy of very cold neutrons are indicated. In particular, promising are quasielastic scattering study with the use of correlation spectroscopy at a pulsed reactor, "reflective" type spectroscopy for investigation of one-dimensional structures, neutron interferometry with a position-sensitive detector. A variant of spectrometer of inelastic scattering of very cold neutrons is proposed in which the fluoroflogopit crystal is used as a monochromator.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1984