

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



РЗ - 11815

П-485

11/211-78

Ю.Н.Покотилловский, А.Д.Стойка, И.Г.Шелкова

5397/2-78

ВОЗМОЖНЫЙ МЕТОД  
РЕГИСТРАЦИИ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭНЕРГИИ  
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

**1978**

РЗ - 11815

Ю.Н.Покотилловский, А.Д.Стойка, И.Г.Шелкова

ВОЗМОЖНЫЙ МЕТОД  
РЕГИСТРАЦИИ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭНЕРГИИ  
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

*Направлено в ПТЭ*



Покотилковский Ю.Н., Стойка А.Д., Шелкова И.Г.

РЗ - 11815

Возможный метод регистрации малых изменений энергии ультрахолодных нейтронов

Предложен метод регистрации малых изменений энергии ультрахолодных нейтронов, происходящих в результате взаимодействия нейтронов с внешним полем. Метод основан на определении изменения потока нейтронов, проходящих последовательно через два интерференционных фильтра, зависящего от изменения энергии нейтронов в пространстве между фильтрами. Каждый из фильтров представляет собой многослойную тонкопленочную систему, составленную из слоев с различным показателем преломления для нейтронов. При соответствующем выборе последовательности слоев коэффициент пропускания нейтронов через такой фильтр в зависимости от энергии имеет резонансный характер. Рассчитана чувствительность метода с учетом неоднородности толщины слоев. Указаны методы определения чувствительности устройства, выбора "рабочей точки". Предложены схемы устройств для регистрации весьма малых изменений импульса холодных и тепловых нейтронов (до  $10^{-5} \div 10^{-6} \text{ \AA}^{-1}$ ), основанные на том же принципе пропускания нейтронов через два интерференционных фильтра, в данном случае под соответствующим углом скольжения.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Pokotilovsky Yu.N., Stojka A.D., Shelkova I.G.

РЗ - 11815

A Method for Registration of Small Changes of Energy of Ultracold Neutrons

A method for registration of small changes of energy of ultracold neutrons being the result of interaction of neutrons with external field is proposed. It is based on determination of change of intensity of neutrons penetrating successively through two interference filters. This occurs when the energy of neutrons is changed in the region between the filters. Quantitative estimates of sensitivity are given. It is pointed out that there is a possibility of determination of small changes of moments of cold and thermal neutrons by this method (up to  $10^{-5} \div 10^{-6} \text{ \AA}^{-1}$ ).

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna 1978

В работе предлагается метод измерения малых изменений энергий и импульса ультрахолодных /УХН/, а также, возможно, холодных и тепловых нейтронов с помощью интерференционных фильтров.

1. Действие интерференционного фильтра основано на резонансных явлениях, возникающих при прохождении волн через два или более малопрозрачных слабопоглощающих слоя /потенциальных барьера/, разделенных промежутками, внутри которых могут образовываться стоячие волны. При резонансе может сильно возрасти прозрачность такой слоистой системы для падающей волны.

Для нейтронов роль потенциальных барьеров и промежутков между ними могут выполнять тонкие пленки материалов с различным коэффициентом преломления<sup>/1,2/</sup>. Последний выражается следующим образом:

$$n^2 = 1 - \frac{U}{E}, \quad /1/$$

$$U = \frac{h^2}{2\pi m} Nb. \quad /2/$$

Здесь  $E$  - кинетическая энергия нейтрона,  $U$  - эффективная потенциальная энергия взаимодействия нейтрона со средой,  $m$  - масса нейтрона,  $N$  - число ядер в единице объема,  $b$  - когерентная длина рассеяния нейтрона на связанном ядре.

На рис. 1 схематически показана форма потенциала в системе из трех пленок, а также зависимость коэф-

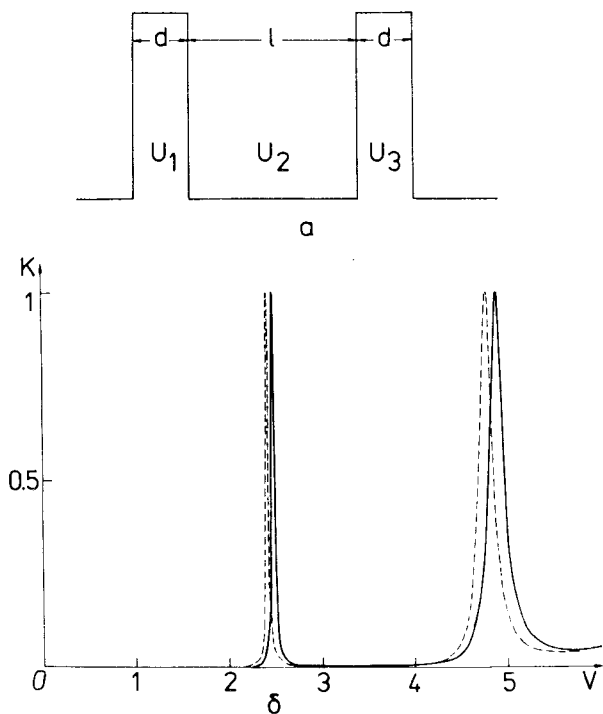


Рис.1. а/ - Форма потенциала взаимодействия нейтрона с трехслойной системой, в слое 2  $U_2=0$ . б/ - Зависимость коэффициента прохождения нейтронов через такую систему от величины компоненты скорости /м/с/, перпендикулярной поверхности пленок;  $U_1=U_3=2,4 \cdot 10^{-7}$  эВ /бериллий/,  $d=200$  А,  $l=600$  А /сплошная линия/ и  $l=620$  А /пунктир/.

коэффициента прохождения нейтронов через такую систему от величины компоненты скорости, перпендикулярной поверхности пленок. Количество, ширина и положение резонансов в этой зависимости определяется высотой потенциальных барьеров и толщиной пленок. Каждый максимум соответствует квазистационарному состоянию нейтрона в потенциальной яме, образуемой двумя потенциальными барьерами. Для трехслойного фильтра, показанного на рис. 1, можно осуществить сдвиг резонансов, например, изменением толщины  $l$ .

2. На рис. 2а показана возможная схема устройства, служащего для определения малого изменения энергии УХН в каком-либо поле /имеется в виду та часть энергии или импульса нейтрона, которая связана с компонентой скорости, перпендикулярной поверхности фильтра/. Нейтроны, поступающие по нейтроноводу 1, проходят последовательно через два фильтра 2 и 3 и затем регистрируются детектором 5. Скорость счета в детекторе будет

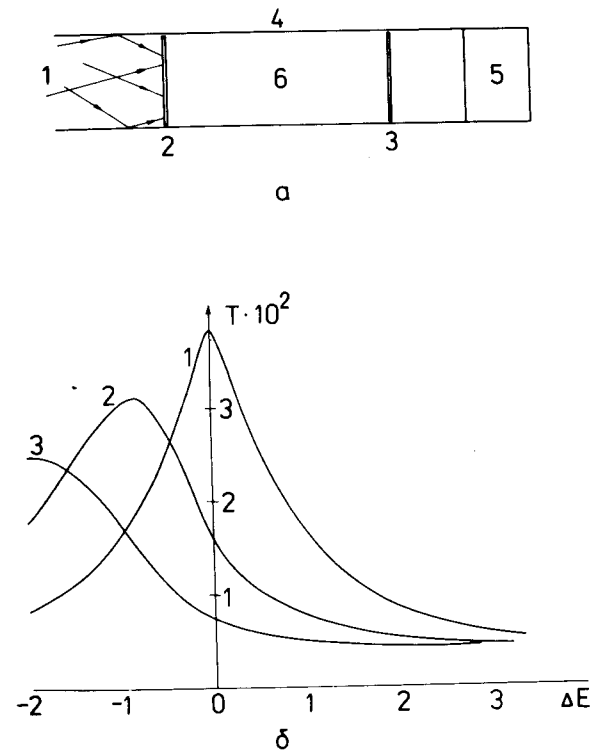


Рис.2. а/ - Схема устройства для регистрации малых изменений энергии или импульса УХН /обозначения в тексте/. б/ - Зависимость проходящего потока нейтронов /в отношении к падающему потоку/ от величины изменения энергии /нэВ/ УХН в пространстве между фильтрами. Первый фильтр:  $U_1=U_3=2,4 \cdot 10^{-7}$  эВ,  $U_2=0,55 \cdot 10^{-7}$  эВ,  $d=200$  А,  $l=1$  мкм. Второй фильтр: параметры те же, за исключением  $l$ : кривая 1 -  $l=1$  мкм; кривая 2 -  $l=1,005$  мкм; кривая 3 -  $l=1,01$  мкм.

изменяться в зависимости от изменения энергии нейтронов на участке 6 между фильтрами. Участок нейтронового 4 в такой установке должен быть зеркальным, при этом угловое распределение нейтронов, поступающих из нейтронового, не играет существенной роли. Качественно ясно, что существует оптимальный сдвиг резонансов, при котором чувствительность устройства максимальна. Последнюю можно сделать довольно высокой, если использовать фильтры с такими параметрами  $\ell$  и  $d$ , чтобы, во-первых, ширина резонансов была весьма малой  $\sim 10^{-9}$  эВ/, а во-вторых, число резонансов было большим /несколько десятков/. В качестве конкретного примера на *рис. 26* показана рассчитанная зависимость коэффициента пропускания системы из двух фильтров от величины изменения энергии нейтронов в пространстве между фильтрами. В расчете предполагалось, что на первый фильтр падают нейтроны с изотропным угловым распределением и описываемые началом максвелловского распределения по энергии с верхней границей, равной высоте барьера. Помимо параметров фильтров, указанных в подписи к рисунку 26, в расчете для каждого фильтра учитывался слой алюминия толщиной 0,1 мм, который мог бы служить подложкой. Отметим, что учет этой подложки, а также поглощения в фильтре и подложке слабо меняет результат. Кроме того, учитывались многократные переотражения нейтронов между фильтрами /что также несущественно изменило результаты расчетов, проведенных без учета переотражений/.

При вычислении коэффициентов прохождения нейтронов сквозь фильтры в ряде случаев использовались рекуррентные соотношения, приведенные в работе<sup>/3/</sup> и весьма удобные для машинных расчетов.

Для регистрации с точностью не хуже одной статистической ошибки сдвига энергии  $\Delta E$  необходимо, чтобы на вход устройства было направлено  $N_0$  нейтронов, при этом

$$\Delta E = \frac{1}{2 \frac{d(\sqrt{T})}{d(\Delta E)} \sqrt{N_0}} \quad /3/$$

Здесь  $T$  - коэффициент пропускания устройства как функция сдвига энергии  $\Delta E$  в промежутке между фильтрами.

3. Если толщины слоев идеально равномерны, то, как показывает расчет, устройство может иметь неограниченную чувствительность. Однако при изготовлении фильтров можно обеспечить лишь ограниченную однородность в толщине слоев. Наибольшее влияние на чувствительность оказывает однородность толщины  $\ell$  /от которой зависит положение резонансов в коэффициенте пропускания/. Если задаться определенным разбросом в толщине  $\ell$ , то обнаруживается максимум в чувствительности при изменении параметров  $\ell$  и  $d$ . При увеличении, например, обеих величин, с одной стороны, уменьшается ширина резонансов в коэффициентах прохождения фильтров, а с другой стороны, сильнее сказывается разброс в толщине  $\ell$  на положении резонансов, что приводит к сглаживанию кривых прохождения, подобных приведенным на *рис. 26*.

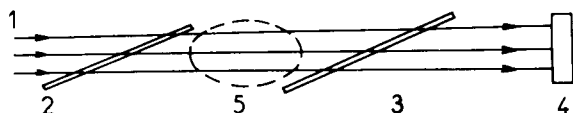
Нами были выполнены расчеты чувствительности устройства для различных величин относительного разброса толщины  $\ell$   $10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ , и  $5 \cdot 10^{-2}$ . Как оказалось, например, для разброса, равного  $10^{-2}$ , и изотропного углового распределения УХН на входе оптимальными параметрами /при величине потенциалов, указанных в подписи к рисунку 26/ являются:  $\ell \approx 2-3$  мкм,  $d \approx 100-150$  Å. В этом случае, при интенсивности на входе  $10^3$  нейтр/с, за время измерения 1 час можно обнаружить сдвиг в энергии, равный  $\sim 3 \cdot 10^{-12}$  эВ, для УХН в диапазоне  $5 \div 20 / 10^{-8}$  эВ, т.е. относительный сдвиг  $\sim 0,5 \cdot 10^{-4}$ . При улучшении однородности толщины чувствительность резко возрастает.

Уместно отметить, что ранее был предложен сравнимый по чувствительности метод "спинового эха" для измерения малых изменений энергии<sup>/4/</sup> нейтронов, также применимый и для УХН.

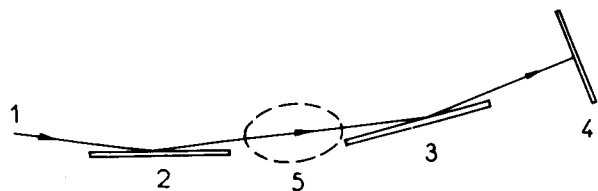
4. Существенным является способ экспериментального определения чувствительности устройства и нахождения "рабочей точки", т.е. измерения кривой прохождения типа приведенной на *рис. 26*. Это можно делать различным образом. Во-первых, можно изменять угол между плоскостями фильтров, например, поворачивая

второй фильтр, при этом изменяется нормальная компонента скорости нейтрона для второго фильтра и соответствующим образом сдвигаются резонансы в коэффициенте пропускания. Во-вторых, можно все устройство /рис. 1а/ поворачивать относительно горизонтальной оси, при этом УХН в пространстве между фильтрами приобретают дополнительную энергию в поле тяжести. В-третьих, чувствительность можно определять путем перемещения второго фильтра по отношению к первому с различной скоростью /аналогично методике мессбауэровской спектроскопии/.

5. На рис. 3 показаны схемы устройств, которые можно использовать для определения малых изменений импульса холодных и тепловых нейтронов.



а



б

Рис.3. Схема устройств для определения малых изменений импульса холодных и тепловых нейтронов: а/ - геометрия пропускания, б/ - геометрия отражения. 1 - падающий пучок нейтронов, 2-3 - резонансные фильтры, 4 - детектор нейтронов, 5 - область, в которой происходит изменение импульса.

Нейтроны в этом случае направляются на фильтр под малым углом скольжения, и в эксперименте определяется изменение компоненты импульса, перпендикулярной поверхности фильтра. При этом можно регистрировать изменение импульса вплоть до  $10^{-5}-10^{-6}$   $\text{А}^{-1}$ . Возможность проведения измерений в геометрии отражения основана на том, что коэффициент отражения, как и коэффициент пропускания, имеет резонансный характер. Возможна и комбинация фильтров, работающих на пропускание и отражение.

В заключение авторы приносят благодарность В.К.Игнатовичу и В.В.Нитцу за советы и обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Shoenborn B.P., Caspar D.L.D., Kammerer O.F. J:Appl.Cryst., 1974, 7, p.508.
2. Антонов А.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1974, 20, с. 632.
3. Игнатович В.К. ОИЯИ, Р4-10778, 1977.
4. Mezei F. Z.Phys., 1972, 255, p.146.

Рукопись поступила в издательский отдел  
31 июля 1978 года.