

12

© 1990

НЕЙТРОННЫЙ МИКРОСКОП С ПРЕЛОМЛЯЮЩИМ КЛИНОМ

С.В. Масалович

При создании зеркального нейтронного микроскопа на ультрахолодных нейтронах (УХН) приходится учитывать специфические аберрации, которые отсутствуют в зеркальной оптике для света [1]. Дело в том, что на распространение нейтронов столь низких энергий заметное влияние оказывает гравитационное поле Земли, в котором нейтроны движутся по параболическим траекториям. При этом кривизна траекторий зависит не только от скорости нейтронов, но и от начального угла входа в оптическую систему. Поэтому аберрации присутствуют даже для монохроматических нейтронов [8]. Влияние гравитации можно учесть, введя показатель преломления для нейтронов в поле тяжести [2]

$$n_g = \sqrt{1 - \frac{2 \cdot g \cdot z}{v^2}}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, z – вертикальная координата, v – скорость нейтрона при $z=0$. Такой вид показателя преломления приводит к описанным выше специфическим гравитационно-хроматическим аберрациям. К настоящему времени найдено несколько схем частичной компенсации таких аберраций [3-11]. Все они построены на зеркальных оптических элементах.

Введение в оптику УХН рефракционных элементов могло бы заметно расширить приборную базу нейтронной микроскопии и открыть новые пути для уменьшения аберраций в нейтронно-оптических системах. Известно, что в обычной оптике для уменьшения хроматических аберраций используют вместе оптические элементы с различной дисперсией. Также и в нейтронной оптике, используя дисперсию рефракционных элементов наряду с дисперсией, обусловленной воздействием на нейтроны гравитационного поля Земли, можно создавать ахроматические системы. Сложность задачи заключается в том, что сечения захвата и неупругого рассеяния ультрахолодных нейтронов в веществе велики, поэтому рефракционные элементы должны быть достаточно тонкими. Тем не менее в отдельных случаях это условие легко выполняется [12]. Ниже рассматривается применение рефракционного элемента в нейтронном микроскопе с горизонтальной оптической осью.

В отличие от схем с вертикальной осью в схемах с горизонтальной осью коэффициент увеличения и положение плоскости изображения в парааксиальном случае в приближении первого порядка малости гравитационного возмущения не зависят от скорости нейтронов на

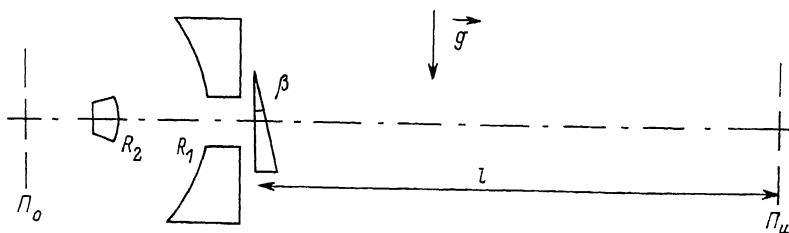


Схема нейтронного микроскопа с преломляющим клином.

Π_0 - плоскость объекта, $\Pi_{и}$ - плоскость изображения, R_1 и R_2 - радиусы сферических concentрических зеркал.

образце. От скорости зависит только вертикальное смещение изображения как целого [13]. Это смещение тем больше, чем меньше скорость нейтронов. Одним из способов компенсации таких аберраций является размещение уголкового отражателя после объектива [11]. Другой способ заключается в применении преломляющего клина. На рисунке показана оптическая схема такого микроскопа. Здесь вместо уголкового отражателя после объектива расположен клин. Траектории нейтронов преломляются клином, это приводит к смещению изображения вверх противоположно действию силы тяжести. Благодаря дисперсии показателя преломления клина изображение для более медленных нейтронов смещается на большую величину, что и создает условие для ахроматизации. Расчет микроскопа в паракиальном приближении проводился одним из методов, предложенных в работе [14]. В результате было получено следующее соотношение между объектом и изображением:

$$z_{и} = M \cdot z_0 - \frac{g \cdot p^2}{2 \cdot v^2}, \quad (2)$$

где $z_{и}$ - вертикальная координата изображения точки объекта с координатой z_0 , M - коэффициент увеличения, который не зависит от скорости, p - функция геометрических параметров системы, v - скорость нейтронов на объекте. Как отмечалось выше, в отсутствии клина влияние гравитационного поля приводит к тому, что изображение объекта оказывается смещенным вниз вдоль плоскости изображения. Размещение за объективом преломляющего клина с углом при вершине β и на расстоянии l от плоскости изображения дает дополнительный член в выражении для вертикального смещения изображения. Полное смещение запишется теперь в виде

$$s(v) = -\frac{g \cdot p^2}{2 \cdot v^2} + \beta \cdot l \cdot (1 - n). \quad (3)$$

Здесь n - показатель преломления клина

$$n = \sqrt{1 - \frac{v_{гр}^2}{v^2}}, \quad (4)$$

$v_{гр}$ – граничная скорость для вещества, из которого сделан клин. Запишем условие ахроматизации изображения:

$$\left. \frac{dS(v)}{dv} \right|_{v=v_{ср}} = 0, \quad (5)$$

$v_{ср}$ – среднее значение скорости нейтронов.

Подставляя (3) в (5), получаем следующее требование на параметры клина:

$$\beta \cdot l = \frac{g \cdot \rho^2}{v_{гр}^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{v_{гр}^2}{v_{ср}^2}}. \quad (6)$$

Для оценок возьмем равномерный спектр скоростей нейтронов от 5.5 до 7.5 м/с и параметры объектива нейтронного микроскопа „ГНОМ“ [15] (см. рисунок): $R_1 = 14.17$ мм, $R_2 = 5.41$ мм, $M \approx -47$. Тогда для клина из кварца ($v_{гр} = 4.6$ м/с) будем иметь $\beta \cdot l = 22.3$ мм. При $l = 190$ мм, т. е. когда клин расположен сразу за объективом, угол при вершине клина должен быть $\beta = 6.7^\circ$. Так как диаметр выходного зрачка объектива 4 мм, то клин получается достаточно тонким. Ослабление пучка нейтронов за счет процессов захвата и неупругого рассеяния в материале клина не превосходит 10 %.

Структура изображения точечного источника и разрешение микроскопа исследовались путем численного моделирования на ЭВМ. В результате расчета для числовой апертуры $A = 0.5$ была получена оценка на разрешение микроскопа $\delta = 5$ мкм в поле зрения 0.3×0.3 мм². Оптимальное значение для угла клина при этом $\beta = 6.5^\circ$. В отсутствие клина при тех же выбранных параметрах разрешение составляло порядка 100 мкм. Переход от равномерного спектра скоростей к линейно и квадратично нарастающим не привело к заметному изменению разрешения.

Таким образом, на примере нейтронного микроскопа с преломляющим клином видно, что применение рефракционных элементов в оптике ультрахолодных нейтронов может существенно облегчить решение задач по ахроматизации нейтронно-оптических систем в гравитационном поле Земли.

Автор благодарен С.С. Арзуманову, А.Н. Стрепетову, А.И. Франку за полезные обсуждения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Франк А.И. // Успехи физических наук. 1987. Т. 151. С. 229.
- [2] Франк И.М., Франк А.И. // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28. С. 559.
- [3] Schütz G., Steyerl A., Mampel W. // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 44. P. 1400.
- [4] Herrmann P., Steinhäuser K.-A.,

- G ä h l e r R., S t e y e r l A., M a m p r e W. // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. P. 1969.
- [5] Арзуманов С.С., Маслович С.В., Стрепетов А.Н., Франк А.И. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. С. 486.
- [6] Арзуманов С.С., Маслович С.В., Стрепетов А.Н., Франк А.И. // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44. С. 213.
- [7] S t e y e r l A., M a l i k S.S. // Physica B+C. 1986. V. 137. P. 270.
- [8] Стрепетов А.Н., Франк А.И. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. С. 71.
- [9] Стрепетов А.Н., Франк А.И. // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1775.
- [10] S t e y e r l A., D r e x e l W., E b i s a w a T., G u t s m i e l d E., S t e i n h a u s e r K.-A., G ä h l e r R., M a m p r e W., A g e r o n P. // Revue Phys. Appl. 1988. V. 23. P. 171.
- [11] Карасева И.А., Маслович С.В., Русинов М.М., Стрепетов А.Н., Франк А.И. В кн.: Нейтронная физика, М.: ЦНИИАтоминформ, 1988. Т. 1. С. 216.
- [12] Маслович С.В. Препринт ИАЭ-4780/14. ЦНИИАтоминформ, М., 1989.
- [13] Маслович С.В. // Вопросы атомной науки и техники, сер. „Общая и ядерная физика“. 1986. В. 3(36). С. 69.
- [14] Маслович С.В., Стрепетов А.Н. Препринт ИАЭ-4536/14, М.: ЦНИИАтоминформ, 1987.
- [15] Буцевичский А.В., Карасева И.А., Русинов М.М., Стрепетов А.Н., Франк А.И. Нейтронный микроскоп: Авторское свидетельство № 1334122. Бюллетень открытий и изобретений. 1987. № 32. С. 204.

Институт атомной энергии
им. И.В. Курчатова

Поступило в Редакцию
8 августа 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 1

12 января 1990 г.

06.3; 07

© 1990

О РОЛИ МЕХАНИЗМОВ НЕОДНОРОДНОГО УШИРЕНИЯ В РЕЛАКСАЦИИ СТИМУЛИРОВАННОГО ФОТОННОГО ЭХА

Н.К. С о л о в а р о в

Общепринято, что для существования долгоживущего стимулированного фотонного эха в твердых телах необходимо наличие в их энергетическом спектре метастабильного уровня, участвующего в процессе релаксации населенностей эхо-уровней, на переходе между которыми возбуждается эхо [1-3]. Модельной является трехуров-