

## МНОГОЗЕРКАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ – ВОЗМОЖНЫЙ ПРОТОТИП НЕЙТРОННОГО МИКРОСКОПА

С.С.Арзуманов, С.В.Масалович, А.Н.Стрелетов,  
А.И.Франк

Описан многозеркальный оптический прибор для пространственной фокусировки УХН, с которым получено нейтронное изображение щели. Применение многозеркальной оптической системы позволяет подойти к решению проблемы уменьшения гравитационных хроматических aberrаций.

В последние годы появилось ряд работ по проблемам фокусировки ультрахолодных нейтронов (УХН) и нейтронной микроскопии<sup>1-7</sup>. Начало этому направлению в нейтронной оптике было положено работой Франка<sup>1</sup>, в которой впервые указывалось на возможность получения нейтронного изображения с помощью вогнутого зеркала и ставился вопрос о создании нейтронного микроскопа. Вопрос о применении нейтронного микроскопа обсуждался в<sup>5,7</sup>.

Одной из существенных трудностей при фокусировке очень медленных нейтронов является заметное воздействие на траекторию нейтрона гравитационного поля Земли. При этом возникают оптические искажения, зависящие от скорости – гравитационные хроматические aberrации. Уменьшение таких aberrаций может быть получено путем предварительной монохроматизации нейтронов, что однако ведет к резкому падению светосилы. Отсутствие в настоящее время достаточно интенсивных источников УХН закрывает такую возможность. В работе<sup>2</sup> предлагалось использовать новый оптический элемент – зонное зеркало. При этом для некоторого диапазона длин волн нейтронов гравитационный хроматизм компенсируется собственным хроматизмом зонного зеркала. Этот элемент был успешно опробован<sup>3</sup>. В работе<sup>4</sup> предлагалось для компенсации гравитационной силы использовать неоднородное магнитное поле с соответствующей величиной вертикальной компоненты градиента. Предложен еще один подход для получения ахроматического нейтронного изображения, основанный на использовании системы из нескольких простых оптических элементов, расположенных на различной высоте<sup>5</sup>.

Настоящая работа посвящена описанию такого оптического прибора и результатов его экспериментального опробования.

Оптическая четырехзеркальная система с вертикальной оптической осью состоит из двух бизеркальных пар. Каждая пара представляет собой сочетание сферического и плоского зеркал (рис.1).

Поясним принцип ахроматизации. Фокусное расстояние вогнутого зеркала при фокусировке нейтронов легко вычислить в параксиальном приближении

$$f_1 = \frac{R}{2} - \frac{gR^2}{8v^2} \quad (1)$$

Здесь  $R$  – радиус зеркала,  $v$  – скорость нейтронов в момент отражения,  $g$  – ускорение силы тяжести. Зеркало расположено горизонтально и нейтроны падают на него вдоль силы тяжести. Пусть теперь выше вогнутого зеркала на высоте  $h < R/2$  помещено плоское зеркало. Фокусное расстояние такой системы в приближении  $2gh \ll v^2$  таково:

$$f_2 = 2h - \frac{R}{2} + \frac{gR}{v^2} \left( h - \frac{R}{8} \right) \quad (2)$$

Заметим, что члены содержащие  $g$  в выражениях (1) и (2), есть смещение положения фокуса для нейтронов относительно фокуса для света. Видно, что при  $h < R/4$ , это сме-

щение для бизеркальной системы меньше, чем для одиночного зеркала. Для перевернутой относительно силы тяжести пары фокусное расстояние есть:

$$f_3 = 2h - \frac{R}{2} - \frac{gR}{v^2} \left( h - \frac{R}{8} \right). \quad (3)$$

Из сравнения (2) и (3) видно, что члены, содержащие  $g$  имеют разные знаки. Эти обстоятельства и позволяют ахроматизировать систему.

Выбор геометрии прибора, обеспечивающей ахроматизацию производился методом, предложенным в <sup>6</sup>. При этом вакууму приписывался показатель преломления  $n(z) = \sqrt{1 - \frac{2gz}{v^2}}$  и для такой оптически неоднородной среды производился расчет оптической системы. Моделирование методом Монте-Карло дало величину разрешения порядка 100 мкм для нейтронов с длинами волн 70 – 120 нм.

Все зеркала были изготовлены из оптического стекла с напыленным слоем никеля толщиной около 150 нм. Диаметр плоских зеркал 2,6 см, сферических – 6 см. Радиусы кривизны вогнутых зеркал составляли примерно 20 и 30 см. Расстояние между ними – 12 см. Источник и изображение располагались вблизи фокусов каждой пары зеркал, так что между вогнутыми зеркалами нейтроны двигались почти вертикально. Объектом являлась входная щель размером 4 x 10 мм<sup>2</sup>. В плоскости изображения помещалась анализирующая щель. Форма изображения исследовалась путем скалирования этой щелью. В качестве детектора использовался He<sup>3</sup> пропорциональный счетчик.

Эксперимент проводился на изогнутом канале очень медленных нейтронов реактора ИР-8 ИАЭ им. И.В.Курчатова. Плотность потока УХН со скоростями от 3,2 до 5,7 м/с составляла 3,6 н/см<sup>2</sup>·с.

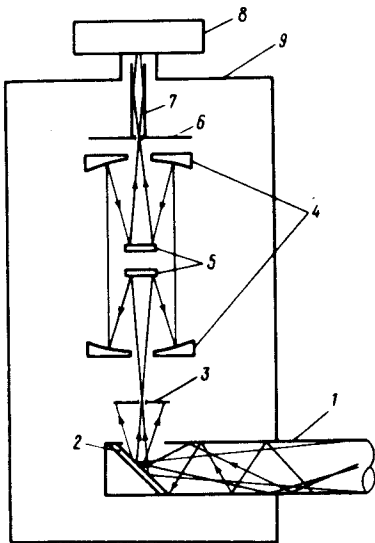


Рис. 1

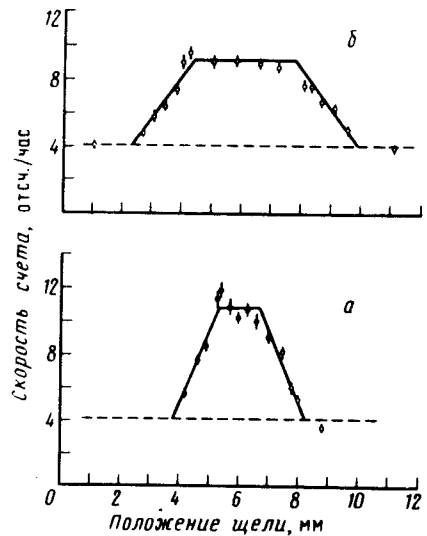


Рис. 2

Рис. 1. Схема оптического прибора: 1 – нейтронный канал, 2 – вспомогательное зеркало, 3 – входная щель, 4, 5 – зеркала оптической системы, 6 – анализирующая щель, 7 – дополнительный нейтронный канал, 8 – детектор, 9 – вакуумная камера

Рис. 2. Зависимость скорости счета детектора от смещения анализирующей щели в геометрии уменьшения (2, а) и увеличения (2, б). Сплошная линия – результат обработки методом наименьших квадратов в предположении о трапециевидальной форме распределения

Зависимость скорости счета детектора от положения анализирующей щели приведена на рис.2. Измерения проведены в двух геометриях, соответствующих величине оптического увеличения  $1,375^{\times}$  и  $0,725^{\times}$ . Ширина анализирующей щели была соответственно 2,0 и 1,3 мм, высота 10 мм. Ширина распределения на полувысоте в геометрии увеличения и уменьшения составила соответственно  $5,42 \pm 0,12$  и  $2,93 \pm 0,09$  мм, что в пределах статистической точности: соответствует ожидаемым величинам 5,5 и 2,9 мм. Форма кривой – размеры оснований и боковых сторон трапеции, также согласуется с ожидаемой в пределах статистической точности.

Следует отметить, что соответствие полученной и ожидаемой ширины само по себе не дает основания делать выводы о хорошем разрешении прибора. Чтобы получить количественные оценки разрешения, следует провести измерения с анализирующей щелью размером много меньшим ожидаемого разрешения на более интенсивном источнике. Еще более предпочтительно использовать координатно чувствительный детектор высокого разрешения.

Поэтому мы расцениваем результаты эксперимента в качестве первой демонстрации возможности использования ахроматических фокусирующих нейтронно-оптических систем со многими элементами, что, как показывают оценки, позволяет создать нейтронный микроскоп с разрешением порядка нескольких мкм. Для получения более высокого разрешения следует, вероятно, обратиться к схемам с частичной компенсацией гравитации неоднородным магнитным полем<sup>4</sup>.

Авторы благодарны Б.Г.Владимирову за изготовление никелиевого покрытия зеркал, А.В.Стрелкову за помощь в изготовлении детектора, а также коллективу службы реактора ИР-8 за содействие в проведении работы. Мы признательны Ю.Г.Абову, С.Т.Беляеву, И.И.Гуревичу, Б.Г.Ерозолимскому, Ю.М.Останевичу и И.М.Франку за весьма полезные обсуждения.

#### Литература

1. Франк И.М. Природа, 1972, № 9, 24.
2. Steyerl A., Schütz G. Appl. Phys., 1978, 17, 45.
3. Schütz G., Steyerl A., Mampe W. Phys. Rev. Lett., 1980, 44, 1400.
4. Скачкова О.С., Франк А.И. Письма в ЖЭТФ, 1981, 33, 27214.
5. Франк А.И. Сб. „Нейтронная физика”, М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1980 г, т.1, стр. 150; Препринт ИАЭ-3409/14, М., 1981 г.
6. Франк А.И. Препринт ИАЭ-3203, М., 1979 г.
7. Golub R., Böning K. Proceeding of the 5-th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Jülich, June, 22 – 26, 1981, p. 99.