

**РЕГИСТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В НЕЙТРОННОМ МИКРОСКОПЕ***С.С.Арзуманов, С.В.Масалович, А.Н.Стрепетов, А.И.Франк*

Сообщается об эксперименте, в котором впервые одновременно присутствуют все необходимые составляющие нейтронного микроскопа: объект, просвечиваемый нейтронами, оптическая система, создающая его изображение, и система регистрации, визуализирующая нейтронное изображение. Нейтронное изображение, зарегистрированное в опыте, обладает контрастом по отношению к типу вещества из которого состоит объект.

Идея зеркального нейтронного микроскопа впервые обсуждалась в начале семидесятых годов <sup>1</sup>. К настоящему моменту осуществлено несколько оптических экспериментов, в которых опробовались те или иные схемы зеркальных оптических систем, предназначенных для трехмерной фокусировки ультрахолодных или очень холодных нейтронов <sup>2-5</sup>. Во всех случаях объектом служила щель или резкий край, изображение которых анализировалось путем сканирования дополнительной щелью. Хотя в этих опытах оптические системы и формировали оптическое изображение, конечным результатом эксперимента являлась некоторая счетная кривая, а не наглядный "образ" объекта.

Ниже описан результат эксперимента, в котором впервые присутствуют все необходимые компоненты нейтрон-микроскопического исследования: объект, просвечиваемый нейтронами, зеркальная оптическая система и детектор, визуализирующий нейтронное изображение.

В отличие от всех иных видов микроскопии волна, зондирующая объект в нейтронном микроскопе, взаимодействует с атомными ядрами. Поэтому можно ожидать, что в этом случае должен проявиться специфический нейтронный контраст по отношению к типу ядер. Контраст должен быть наибольшим при использовании очень медленных нейтронов, в частности УХН.

Из-за малости энергии УХН их траектории заметным образом искривляются силой тяжести Земли. Поэтому в оптике УХН появляются специфические гравитационные aberrации. При этом различают геометрические aberrации, которые имеют место даже в случае монохроматического излучения <sup>6</sup>, и гравитационный хроматизм. Последний подразделяют на хроматизм положения и хроматизм увеличения. В работах <sup>2-4</sup> применялись так или иначе ахроматизированные оптические системы. Описываемый ниже прибор также был ахроматизирован в первом порядке относительно обоих видов хроматических искажений, причем осуществлялся иной, чем в <sup>4</sup> подход.

Помимо одномерного анализа изображения, работы <sup>2-5</sup> объединяет относительно низкая интенсивность использовавшихся источников УХН. При этом приходилось иметь дело с достаточно малой скоростью регистрации, составлявшей иногда несколько отсчетов в час.

Недавний ввод в строй высокоинтенсивных источников УХН в Ленинграде <sup>7</sup> и в Гренобле <sup>8</sup>, а также появление новых детекторов, пригодных для регистрации двумерного изображения, позволяют перейти к качественно новому этапу в работах по практической оптике УХН.

Описываемый ниже эксперимент был осуществлен на новом источнике УХН Ленинградского института ядерной физики. Схема прибора приведена на рис. 1. Он представлял собой модификацию устройства, использовавшегося нами в предыдущей работе<sup>3</sup>. Оптическая часть прибора состояла из двух вогнутых зеркал с радиусами кривизны примерно 20 и 30 см. Объект располагался в фокусе первого зеркала. Расстояние между зеркалами удовлетворяло простому условию, обеспечивающему ахроматизацию в первом порядке как по увеличению, так по положению:

$$R_1 + R_2 = 6d. \quad (1)$$

Здесь  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы зеркал,  $d$  — расстояние между ними. В этой геометрии положения нейтронного и оптического изображений должны совпадать.

На сферические стеклянные зеркала путем распыления в вакууме был нанесен слой сплава  $Ni^{58} - Mo$  с граничной скоростью для нейтронов около 8 м/с.

Двухзеркальная оптическая система с входной числовой апертурой  $A = 0,25$  и оптическим увеличением  $m \approx 1,4^{\times}$  обеспечивала формирование изображения в плоскости, где располагался чувствительный слой детектора изображения.

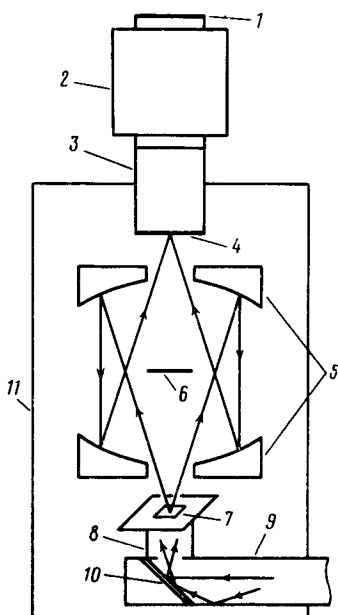


Рис. 1. Схема установки: 1 — фотопленка, 2 — электронно-оптический преобразователь, 3 — волоконный световод, 4 — сцинтиллятор, чувствительный к УХН, 5 — зеркала оптической системы, 6 — защита от прямых "лучей", 7 — объект, 8, 9 — нейтронотводы, 10 — вспомогательное зеркало

Детектор представлял собой сцинтилляционный детектор УХН с электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) и регистрацией света на фотопленке. За исключением фоторегистрации, его устройство близко к устройству детектора резонансных нейтронов, описанного в<sup>9</sup>. Использовался сцинтиллятор  $ZnS$  толщиной 10 — 15 мкм на который был напылен слой алюминия толщиной 0,2 — 0,3 мкм, а на него — соединение  $LiF$  толщиной  $100 \text{ мкг/см}^2$ <sup>10</sup>, содержащее в равных долях изотопы  $Li^6$  и  $Li^7$ . Применение  $Li^7$  обусловлено желанием снизить граничную скорость чувствительного слоя. Свет от сцинтилляций, возникающих при захвате УХН в  $Li^6$  с реакцией  $Li^6(n, \alpha)T$ , выводился по волоконному световоду из вакуумной камеры, усиливался ЭОП на основе микроканальной пластины с волоконной оптикой на входном и выходном окнах, а затем регистрировался фотопленкой.

Прибор присоединялся к выходному нейтронотводу жидководородного источника УХН с плотностью потока на выходе  $6 \cdot 10^3 \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$ . Поступив в прибор, нейтроны по двум внутренним нейтронотводам подводились к объекту. Использовалась геометрия освещения на про-свет.

В первом случае объектом являлась крестообразная диафрагма. На рис. 2 представлено ее изображение, зарегистрированное на фотопленке после получасовой экспозиции.

Во втором случае объект представлял собой кремниевую пластинку толщиной 0,35 мм, на которую методом фотолитографии был нанесен никелевый рисунок. Толщина слоя никеля составляла примерно 200 нм. На рис. 3 представлен оригинал, с которого изготавливался этот объект, и его нейтронное изображение, полученное при экспозиции 2,5 часа. Толщина линии, изображающей на рисунке траекторию нейтрона, отражающегося от зеркала, составляла 200 мкм, что дает представление об экспериментальной величине разрешения. Оптимизация настройки прибора по разрешению в ходе эксперимента не производилась. Детектор был помещен в расчетное положение с точностью 0,5 мм, что вполне объясняет возможную расфокусировку в 150 – 200 мкм.

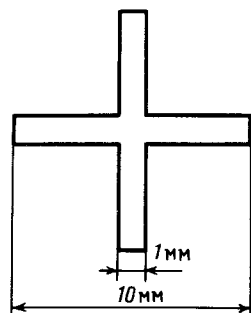
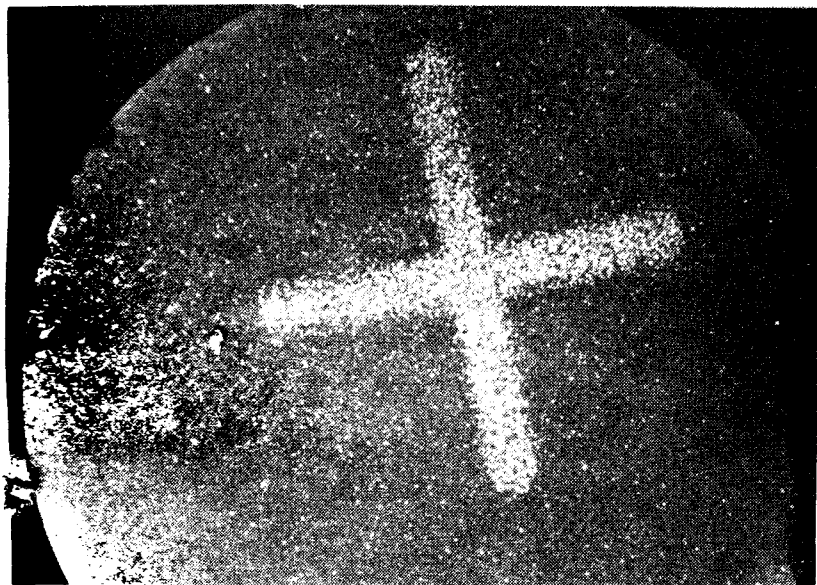


Рис. 2

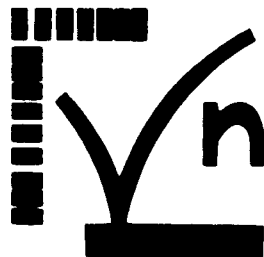
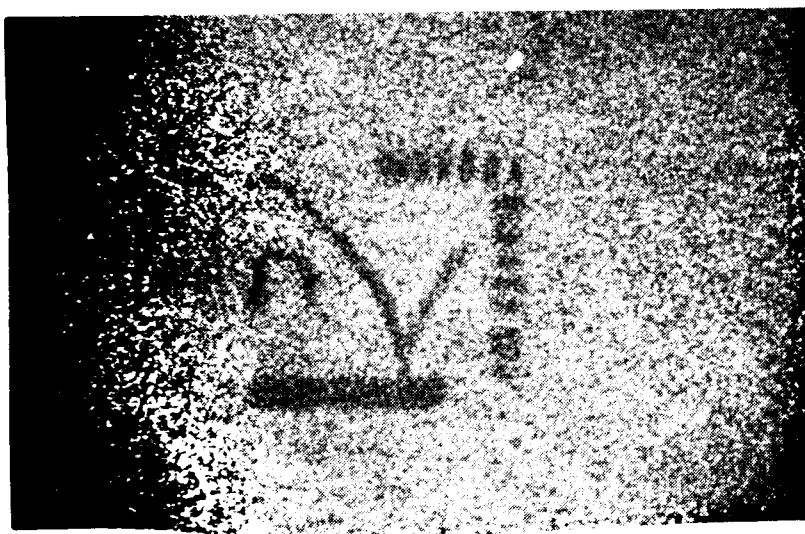


рис. 3

Рис. 2. Изображение крестообразной диафрагмы. На врезке показаны ее размеры

Рис. 3. Фотошаблон, с которого изготавливался тест-объект и изображение объекта, зарегистрированное в нейтронном "свете". Темным участкам соответствует покрытие из никеля

Таким образом, впервые зарегистрировано изображение объекта с двумерной структурой, сформированное нейтронно-оптической системой. Одновременно продемонстрировано существование в оптике УХН нейтронного ядерного контраста.

Авторы благодарны А.П.Сереброву за поддержку и гостеприимство, сделавшие возможным проведение этой работы в ЛИЯФ, а также П.С.Яйджиеву, А.В.Васильеву и А.И.Иоффе за помощь в работе. Мы благодарим Н.В.Боровикову, изготовившую покрытие зеркал и В.Г.Никольского с сотрудниками, изготовивших тест-объект.

#### Литература

1. Франк И.М. Природа, 1972, № 9, 24.
2. Schütz G., Steyerl A., Mampe W. Phys. Rev. Lett., 1980, 44, 1400.
3. Арзуманов С.С., Стрелетов А.Н., Масалович С.В., Франк А.И. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 486.
4. Herrmann P., Steinhäuser V.A., Gähler R. et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 1969.
5. Steyerl A., Malik S.S. Physica. B + C, 1986, 137, 270.
6. Стрелетов А.Н., Франк А.И. Письма в ЖТФ, 1986, 12, 71.
7. Lobashev V.M., Serebrov A.P. Journ. de Physique, 1984, Colloque C3, 45, C3-11.
8. Ageron P., Mampe W. Journ. de Physique, 1984, Colloque C3, 45, C3-279, and in: The Investigation of Fundamental Interaction with Cold Neutrons. Ed. by Green C.L., NBS, SP711, p. 16, 1986.
9. Schrack R.A. Nucl. Instr. Meth., 1984, 222, 499.
10. Novopoltsev M.J., Pokotilovskii Yu. N. Nucl. Instr. Meth., 1980, 171, 497.

Институт атомной энергии  
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию  
8 июля 1986 г.