

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

**P3-87-220**

**Ю.В.Таран**

**НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ  
В ИССЛЕДОВАНИИ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК  
С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ**

Направлено в Оргкомитет Международной конференции  
по нейтронной физике /Киев, 21-25 сентября 1987 г./

**1987**

1. Поляризованные пучки медленных нейтронов получили широкое применение в исследовании конденсированных сред, в частности тонких магнитных пленок. В последнее десятилетие доступными стали поляризованные ультрахолодные нейтроны (УХН). Для поляризации УХН используются тонкие ферромагнитные пленки. Изучению пленок различного состава для этих целей посвящен ряд работ (см., например, в обзоре <sup>/1/</sup> соответствующую библиографию). Однако исследование магнитных пленок с помощью УХН находится еще в начальной стадии. Предстоит довести поляризующую способность ферромагнитных пленок практически до идеальной, чтобы на их основе создавать эффективные затворы и прерыватели пучков УХН. Полезным может оказаться перенесение в область УХН методик исследования тонких магнитных пленок, развитых для тепловых нейтронов. В частности, это относится к известному методу измерения деполяризации пучка поляризованных нейтронов, прошедшего через тонкие пленки.

В настоящей работе описываются некоторые методические возможности в исследовании тонких магнитных пленок с помощью УХН. Они базируются на теории прохождения УХН через систему из независимых магнитных пленок, разработанной в <sup>/2/</sup>.

2. Используем эту теорию при рассмотрении многократного прохождения пучка УХН через одну и ту же пленку, пока не конкретизируем, каким образом такое прохождение может быть осуществлено. Действие пленки на пучок описывается квадратной матрицей 2-го порядка:

$$M = \begin{pmatrix} m_{++} & m_{+-} \\ m_{-+} & m_{--} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $M_{ij}$  - матричные элементы, представляющие собой вероятность того, что нейтрон с начальной проекцией спина  $j$ , равной  $+\frac{1}{2}$  или  $-\frac{1}{2}$ , на направление против магнитного после прохождения через пленку окажется в состоянии с проекцией  $i$ . Нейтронный пучок характеризуется двумерным вектором:

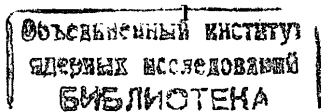
$$n = \begin{pmatrix} n_+ \\ n_- \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $n_{\pm}$  - компоненты вектора, пропорциональные интенсивностям соответствующих спиновых составляющих пучка. Для неполяризованного пучка  $n_+ = n_- = 1$  и  $n \equiv n_0$ .

Измеряя интенсивности пучка с пленкой и без нее, можно определить величину пропускания пленки  $T_0$ :

$$T_0 = (n'_0 M n_0) / (n'_0 n_0) = \frac{1}{2} (m_{++} + m_{+-} + m_{-+} + m_{--}). \quad (3)$$

Здесь и далее штрих у вектора или матрицы означает транспортирование, а их умножение производится по обычным правилам.



В /3/ было отмечено, что матрица пропускания пленки зависит от направления прохождения. Там же было показано, что матрицы пропускания пленки в прямом ( $\vec{M}$ ) и обратном ( $\vec{M}'$ ) направлениях связаны соотношением

$$\vec{M}' = \vec{M}^{-1} \quad (4)$$

Здесь и далее стрелка показывает направление пучка относительно фиксированной в пространстве пленки. Используя (I-4), нетрудно показать, что

$$\vec{T}_0 = \vec{T}_0' \quad (5)$$

т.е. однократное пропускание не зависит от направления пучка.

После прохождения через пленку первоначально неполяризованный пучок приобретает поляризацию:

$$\vec{P} = (n_0' \vec{\sigma}_z M n_0) / (n_0' M n_0) = \frac{1}{2T_0} [(m_{++} + m_{+-}) - (m_{-+} + m_{--})] \quad (6)$$

где  $\vec{\sigma}_z$  - матрица Паули. Следуя традиции, будем называть величину  $\vec{P}$  поляризующей способностью пленки. Вследствие (4) поляризующая способность пленки зависит от направления пучка:

$$\vec{P}' = \frac{1}{2T_0} [(m_{++} + m_{-+}) - (m_{+-} + m_{--})] = \vec{P} + \frac{m_{-+} - m_{+-}}{T_0} \quad (7)$$

Для определения поляризующей способности надо пучок пропустить через пленку в обратном направлении и измерить его интенсивность с включенным и выключенным спин-флиппером, т.е. так называемое  $R$ -отношение. Представим вектор прошедшего пучка после однократного пропускания в виде \*

$$n_1 = \vec{M}' n_0 = T_0 (I + \vec{P}' \vec{\sigma}_z) n_0 \quad (8)$$

где  $I$  - единичная  $2 \times 2$ -матрица. Тогда, учитывая, что вектор пучка после двухкратного пропускания равен

$$n_2 = \vec{M}' F_1 n_1 \quad (9)$$

где

$$F_1 = \frac{1}{2} [(I + \vec{\sigma}_x) + \psi_1 (I - \vec{\sigma}_x)] \quad (10)$$

\* Ур.(8) следует из разложения вектора  $n$  по полной системе ортогональных векторов  $n_0$  и  $\vec{\sigma}_z n_0$ :  $n = c_1 n_0 + c_2 \vec{\sigma}_z n_0$ , где  $c_1$  и  $c_2$  - неизвестные коэффициенты. Умножая это выражение последовательно на  $n_0$  и  $n_0 \vec{\sigma}_z$ , получим согласно (3) и (6)  $c_1 = T_0$  и  $c_2 = T_0 \vec{P}$ .

и  $\psi_1$  - матрица преобразования и эффективность флиппера соответственно,  $\vec{\sigma}_x$  - матрица Паули, получим величину двухкратного пропускания:

$$T_{\rightarrow} = (n_0' n_2) / (n_0' n_0) = T_0^2 (1 + \psi_1 \vec{P}' \vec{A}) \quad (11)$$

Здесь введена величина  $A$ , называемая анализирующей способностью пленки:

$$\vec{A} = (n_0' \vec{M}' \vec{\sigma}_z n_0) / (n_0' \vec{M}' n_0) \quad (12)$$

Раскрывая (12), получим

$$\vec{A} = \frac{1}{2T_0} [(m_{++} + m_{+-}) - (m_{-+} + m_{--})] \quad (13)$$

что совпадает с (6), т.е. поляризующая способность пленки в прямом направлении равна анализирующей способности в обратном направлении:

$$\vec{P} = \vec{A} \quad (14)$$

Для анализирующей способности пленки в прямом направлении получим

$$\vec{A} = (n_0' \vec{M} \vec{\sigma}_z n_0) / (n_0' M n_0) = \frac{1}{2T_0} [(m_{++} + m_{-+}) - (m_{+-} + m_{--})] \quad (15)$$

что совпадает с (7), т.е.

$$\vec{P}' = \vec{A} \quad (16)$$

Соотношения (14) и (16) замечательны тем, что они открывают возможность раздельного определения поляризующей и анализирующей способностей магнитной пленки. Действительно, аналогично (11) получим

$$T_{\leftarrow} = T_0^2 (1 + \psi_2 \vec{P} \vec{A}'), \quad (17)$$

где  $\psi_2$  - эффективность флиппера, расположенного по другую сторону пленки. Вводя эффект двухкратного пропускания:

$$\epsilon = \frac{R-1}{R+1}, \quad (18)$$

пользуясь (14) и (16) и считая для простоты флипперы идеальными, получим

$$\vec{P} = \sqrt{\epsilon} \vec{A}_{\rightarrow} \quad (19)$$

$$\vec{A} = \sqrt{\epsilon} \vec{A}_{\leftarrow} \quad (20)$$

3. В /4/ был предложен так называемый накопительный вариант поляризационного анализа УХН, в котором для разворота пучка в обрат-

ном направлении используется накопительная ловушка (рис.1). Между пленкой и ловушкой располагается флиппер. В /5/ было указано на возможность использования этой схемы для поляризации входного и двойного анализа поляризации выходного пучка в установке для измерения ЭДМ нейтрона, которая была позже реализована в /6/. Схема на рис.1 позволяет определить поляризующую способность пленки.

4. Более широкие возможности дает схема (рис. 2), в которой используются две ловушки и два флиппера /7/. Помимо определения поля-

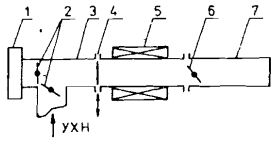


Рис.1. Схема установки для поляризационного анализа УХН в накопительном варианте с одной ловушкой: 1 - детектор УХН, 2 - заслонки, 3 - зеркальный нейтронотвод, 4 - ферромагнитная пленка, 5 - спин-флиппер, 6 - заслонка, 7 - ловушка УХН.

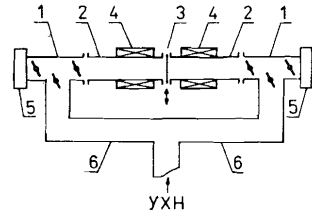


Рис.2. Схема установки для поляризационного анализа УХН в накопительном варианте с двумя ловушками: 1 - ловушка, 2 - нейтронотвод, 3 - ферромагнитная пленка, 4 - спин-флиппер, 5 - детектор УХН, 6 - подводный нейтронотвод.

ризирующей и анализирующей способностей в этой схеме можно осуществить трехкратное пропускание УХН через пленку.

Третье пропускание по отношению к пучку после двухкратного пропускания играет роль анализатора его поляризации. Вычислим поляризацию пучка после двухкратного пропускания, следуя (6) и используя (8-12):

$$P_{12} = (n'_0 \sigma_z n_2) / (n'_0 n_2) = \frac{\vec{A} + \varphi_1 \vec{P} \vec{S}}{1 + \varphi_1 \vec{P} \vec{A}}, \quad (21)$$

где введено обозначение:

$$\vec{S} = (n'_0 \sigma_z \vec{M} \sigma_z n_0) / (n'_0 \vec{M} n_0). \quad (22)$$

Нетрудно показать, что

$$\vec{S} = \vec{S} = \frac{1}{2T_0} [(m_{++} + m_{--}) - (m_{-+} + m_{+-})]. \quad (23)$$

Согласно /7/ будем называть (23)  $S$ -фактором пленки. Его величина не зависит от направления пучка.

Действуя в духе (9-11), получим, что величина трехкратного пропускания не зависит от первоначального направления пучка и равна

$$T_{\vec{S}} = T_{\vec{S}} = T_0^3 (1 + \varphi_1 \vec{P}^2 + \varphi_2 \vec{A}^2 + \varphi_1 \varphi_2 \vec{P} \vec{S} \vec{A}). \quad (24)$$

Измерив с помощью идеальных флипперов три соответствующих  $R$ -отношения, составим из них выражения для эффектов трехкратного пропускания с учетом (24):

$$R_1 = \frac{R_1 - 1}{R_1 + 1} = \frac{\vec{P}^2 + \vec{P} \vec{S} \vec{A}}{1 + \vec{A}^2}, \quad (25)$$

$$R_2 = \frac{R_2 - 1}{R_2 + 1} = \frac{\vec{A}^2 + \vec{P} \vec{S} \vec{A}}{1 + \vec{P}^2}, \quad (26)$$

$$R_3 = \frac{R_{12} - 1}{R_{12} + 1} = \frac{\vec{P}^2 + \vec{A}^2}{1 + \vec{P} \vec{S} \vec{A}}. \quad (27)$$

Комбинируя (19-20) с одним из выражений (25-27), можно определить  $S$ -фактор. Система (25-27) позволяет вычислить набор  $\vec{P}$ ,  $\vec{A}$  и  $S$ , не привлекая (19-20). Получение такой избыточной информации может быть полезно для перепроверки результатов.

Таким образом, схема на рис.2 дает возможность измерить четыре интегральные поляризационные характеристики ферромагнитной пленки: пропускание  $T_0$ , поляризующую ( $P$ ) и анализирующую ( $A$ ) способности и  $S$ -фактор. Так как величины  $T_0$ ,  $P$ ,  $A$  и  $S$  образуют линейно-независимые комбинации (3), (6), (15) и (23) матричных элементов  $m_{ij}$ , то, измеряя эти параметры, можно восстановить матрицу пропускания пленки. Знание матрицы пропускания позволяет осуществить сравнительный анализ различных механизмов деполаризации УХН при прохождении через пленку и найти их относительные вклады. Обсуждение этих вопросов дано в /1,7/.

5. Анализ перетекания УХН с начальным максвелловским спектром из одной ловушки в другую для схемы на рис.2 показал /8/, что во второй ловушке можно захватить следующую максимальную долю стартового количества УХН в первой ловушке:

$$D = 8 / \sqrt{-S_1 R_1 - S_2 R_2 + S_3 R_3 + S_4 R_4}, \quad (28)$$

где  $S_i = 2(\tau + i) - 1$ ,  $R_i = (\tau + i - 1)^2 + (\tau + i)^2$ ,  $i = 1 \div 4$ ,  $\tau$  - отношение длин нейтронотвода и ловушки. При этом спектр захваченных УХН, во-первых, не засорен нейтронами, побывавшими в ловушке ранее, а значит,

возможно, вторично взаимодействовавшими с пленкой, а во-вторых, практически близок к максвелловскому (частично срезана мягкая часть спектра). Для изучения влияния возможных небольших искажений спектра на результаты измерений поляризационных характеристик магнитной пленки, а также для исследования спектральных зависимостей этих характеристик можно использовать метод временной отсечки, в котором момент закрытия входной заслонки ловушки варьируется по отношению к моменту выпуска УХН. Возможно также использование интерференционных фильтров для монохроматизации по продольной компоненте скорости УХН.

Для реалистических значений  $\gamma = 5 \cdot 10^5$  величина  $D$  составляет  $17 \cdot 10\%$ , поэтому трехкратное пропускание связано с заметной потерей интенсивности. Однако достигнутые в настоящее время потоки УХН  $10^4 + 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  заведомо достаточны для проведения таких измерений.

6. Возможен другой вариант установки для измерения многократного пропускания УХН через пленку, в которой используется одна ловушка (рис.3). Оба конца ловушки соединяются изогнутым зеркальным нейтроноводом.

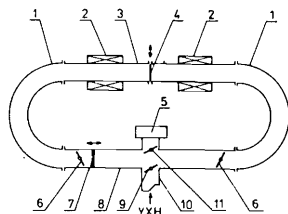


Рис.3. Схема установки для поляризационного анализа УХН в накопительном варианте с отражателем в ловушке: 1 - изогнутый зеркальный нейтроновод, 2 - спин-флиппер, 3 - прямой зеркальный нейтроновод, 4 - ферромагнитная пленка, 5 - детектор УХН, 6 - торцевая заслонка, 7 - отражатель УХН, 8 - ловушка, 9 - входная заслонка, 10 - входной канал УХН, 11 - детекторная заслонка.

пленок связано с их переносом на другие установки. Желательно совмещение этих стадий эксперимента. В частности, можно осуществить совмещение обычной (проточной) схемы поляризационного анализа УХН с накопительным вариантом (рис.4).

Внутри ловушки имеется ободосторонний отражатель УХН. Отражатель, находящийся в одном из крайних положений, приводится в движение с некоторой задержкой относительно начала выпуска УХН из ловушки в нейтроновод. Окончание движения отражателя подбирается таким образом, чтобы захватить наибольшее количество УХН, влетающих в ловушку с другой стороны. Начиная цикл измерений с разных положений отражателя, можно полностью симметризовать процедуру измерений.

7. Схемы на рис.2 и 3 предназначены для измерений поляризационных характеристик магнитных пленок. Однако использование этих

Устройство содержит две ловушки, соединенные зеркальным нейтроноводом с тремя разрывами для установки пленок. Пленки могут выдвигаться из нейтроновода, оставаясь в намагничивающем поле, а также поворачиваться на  $180^\circ$  вокруг оси, направленной вдоль этого поля.

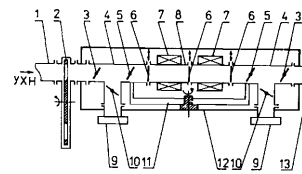


Рис.4. Схема установки для поляризационного анализа УХН с совмещением проточного и накопительного вариантов: 1 - входной канал УХН, 2 - прерыватель пучка УХН, 3 - заслонка, 4 - ловушка, 5 - заслонка, 6 - магнитная пленка, 7 - спин-флиппер, 8 - зеркальный нейтроновод, 9 - детектор УХН, 10 - заслонка, 11 - вращающаяся платформа, 12 - вакуумный кожух, 13 - детектор УХН.

пленка, которая устанавливается в любом из трех разрывов нейтроновода. Процедура измерений такая же, как по схемам на рис.1 и 2. Эта новая возможность независимого определения поляризационных характеристик поляризатора и анализатора поляризации на их рабочих местах может оказаться полезной при исследованиях в проточном режиме. Измерения в проточном режиме можно проводить как со стационарным, так и с импульсно-модулированным потоком УХН.

Наличие трех разрывов позволяет осуществить обычную схему поляризационного анализа с поляризатором и анализатором поляризации пучка, устанавливаемыми в периферийных разрывах, и исследуемым объектом, размещаемым в центральном разрыве. Использование этой известной схемы для исследований широкого класса магнитных пленок в новой, ультрахолодной области энергий нейтронов может дать дополнительную информацию об их свойствах.

## Литература

1. Таран Ю.В. ОИЯИ, РЗ-86-70, Дубна, 1986.
2. Игнатович В.К., Таран Ю.В. - В кн.: Нейтронная физика. Материалы 6-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике (Киев, 1983 г.). М.: ЦНИИАтоминформ, 1984, т.4, с.17.
3. Игнатович В.К., Таран Ю.В. ОИЯИ, РЗ-82-440, Дубна, 1982.
4. Таран Ю.В. - ОИЯИ, РЗ-9307, Дубна, 1975.
5. Таран Ю.В. - В кн.: Нейтронная физика. Материалы 4-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике (Киев, 1977 г.). М.: ЦНИИАтоминформ, 1977, ч.1, с.200.
6. Pendlebury J.M. et al. - Phys.Lett., 1984, 136B, p.327.
7. Таран Ю.В. - В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 12-85, Дубна, 1985, с.48.
8. Лушиков В.И., Таран Ю.В. ОИЯИ, РЗ-85-429, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 апреля 1987 года.

Таран Ю.В.  
Новые возможности в исследовании магнитных пленок  
с помощью ультрахолодных нейтронов

РЗ-87-220

Теоретически рассмотрено прохождение ультрахолодных нейтронов (УХН) через ферромагнитные пленки. Показана возможность получения новой информации о спиновой зависимости взаимодействия УХН с намагниченными пленками при исследовании многократного пропускания. Предложено два варианта установки для измерения таких пропусканий через одну ферромагнитную пленку с использованием накопительных ловушек УХН. Проанализирован процесс перетекания УХН из одной ловушки в другую через соединительный зеркальный нейтронпровод, показана возможность захвата заметной доли стартового потока УХН. Рассмотрено совмещение проточного и накопительного режимов в одной установке, и отмечена ее перспективность для исследования тонких магнитных пленок.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

## Перевод автора

Taran Yu.V.  
New Possibilities in the Study of Magnetic Films  
with Ultracold Neutrons

РЗ-87-220

Theoretical consideration is given to the transmission of ultracold (UCN) neutrons through ferromagnetic films. A possibility is demonstrated to derive new information about spin dependence of the UCN-magnetic film interaction from experiments on UCN multitransmission. Two versions of the apparatus on the basis of UCN traps are proposed to measure repeated transmissions through one and the same film. Under analysis is the process of UCN flow from one trap into the other through a mirror neutron guide. There is shown a possibility of storing a considerable part of the initial UCN flux. A combination of the UCN flow and storage modes in one apparatus is considered to show good prospects for the future study of thin magnetic films.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987