

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

4887 / 82

P3-82-440

В.К.Игнатович, Ю.В.Таран

ВОЗМОЖНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ МАТРИЦЫ
ПРОПУСКАНИЯ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ПЛЕНКАМИ

1982

1. Поляризация ультрахолодных нейтронов /УХН/ осуществляется путем пропускания их через тонкую ферромагнитную пленку. Взаимодействие вещества с нейтронами описывается потенциалом

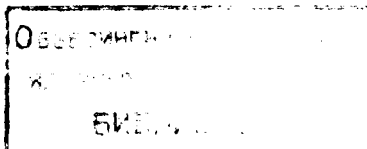
$$U = \frac{\hbar^2}{2m} 4\pi N_0 b - \vec{\mu} \vec{B}, \quad /1/$$

где m - масса; $\vec{\mu}$ - магнитный момент нейтрона; b - длина когерентного рассеяния на ядрах вещества; N_0 - число ядер в единице объема; \vec{B} - индукция магнитного поля внутри вещества. Из выражения /1/ следует, что для нейтронов со спином, параллельным B , потенциал U выше, чем со спином, антипараллельным \vec{B} , поэтому первые должны полностью отражаться от пленки, если их энергия меньше $U_M = \frac{\hbar^2}{2m} 4\pi N_0 b + |\mu| B$, тогда как вторые могут

пройти сквозь нее, и, таким образом, можно ожидать стопроцентной поляризации прошедших нейтронов. Эксперименты, однако, показывают, что поляризация прошедшего пучка не достигает 100%. В опытах с поликристаллическими пленками железа были получены следующие результаты: 75 ± 7% /1/, 80 ± 82% /2/, 85 ± 87% /3/. С помощью монокристаллической пленки железа удалось добиться поляризации 97 ± 99% /4/. Возникает вопрос, почему поляризующая эффективность поликристаллической пленки существенно ниже?

По этому поводу существует несколько предположений. Во-первых, можно думать, что намагниченность пленки может оказаться неполной, хотя толщина ее и подбирается таким образом, чтобы она оказалась мономоноенной. Во-вторых, пленка может содержать отверстия, через которые проходят нейтроны обеих поляризаций. В-третьих, возможна деполяризация на неоднородностях поля вблизи поверхности /5/, и, наконец, в-четвертых, поле внутри пленки может быть неколлинеарно внешнему полю /6/. Интересно было бы установить, какой же из этих механизмов играет определяющую роль.

Нужно сказать, что ответить на этот вопрос трудно уже потому, что сам анализ поляризации содержит много неопределенных факторов. Дело в том, что анализатор включает в себя тоже поляризующую пленку, свойства которой так же неизвестны, как и свойства поляризатора. Кроме того, сюда входит устройство для реверса спина /спиновый флиппер/, эффективность которого может быть отличной от единицы, и между пленками анализатора и поляризатора имеется пространство, при пролете через которое нейт-



рон может дополнительно деполаризоваться. Возможный непараллелизм направлений намагниченности поляризатора и анализатора также можно интерпретировать как деполаризацию.

Проведенные ранее эксперименты осуществлялись с двумя пленками в проточном варианте при стационарном течении газа УХН /1-3/ через поляризационную установку или при импульсной модуляции потока УХН /4/ /в последнем случае использовался метод времени пролета/. В опытах этого типа можно определить только среднегеометрическую поляризующую эффективность поляризатора и анализатора $\sqrt{(\vec{p}_P \vec{p}_A)}$.

Приведенные выше значения поляризации как раз и являются среднегеометрическими. Анализ этого вопроса посвящены работы /7-10/.

В /11/ был предложен накопительный вариант установки, в котором одна и та же пленка может быть использована в качестве поляризатора и анализатора. При этом, во-первых, исчезает эффект деполаризации из-за непараллелизма намагниченностей поляризатора и анализатора, а во-вторых, измерение двухкратного пропускания через пленку при напуске и выпуске УХН из накопительной камеры позволяет найти поляризующую эффективность пленки. В настоящей работе показано, каким образом можно экспериментально извлечь все данные о поляризующих свойствах одной намагниченной пленки и как по этим данным можно судить о деполаризующих факторах.

2. Пропускание любой пленки /в том числе и намагниченной/ можно охарактеризовать квадратной матрицей 2x2. Она, вообще говоря, может зависеть от направления пропускания /пленка не обязательно должна быть симметричной/ и от импульсов падающего \vec{k} и прошедшего через пленку \vec{k}' нейтронов. Таким образом, эта матрица может быть представлена в виде

$$M(\vec{k}, \vec{k}') = \begin{pmatrix} \vec{a}_{++}(\vec{k}, \vec{k}') & \vec{a}_{+-}(\vec{k}, \vec{k}') \\ \vec{a}_{-+}(\vec{k}, \vec{k}') & \vec{a}_{--}(\vec{k}, \vec{k}') \end{pmatrix}, \quad /2/$$

где значок " \vec{a} " указывает на пропускание слева направо или наоборот, а матричные элементы $\vec{a}_{ij}(\vec{k}, \vec{k}')$ с $i, j = \pm$ представляют собой вероятность, что нейтрон с начальным спиновым состоянием j /против поля /+/ или вдоль него /-// пройдет через пленку и в результате окажется в другом заданном спиновом состоянии i . Мы не будем учитывать неупругих процессов, и потому импульс прошедшего нейтрона может отличаться от импульса падаю-

щего только направлением, но не величиной /предполагаем, что внешнее поле достаточно мало, чтобы его влиянием на кинетическую энергию нейтрона вне пленки можно было пренебречь/. Отметим также, что матричные элементы зависят только от компоненты импульса k_{\perp} , направленной перпендикулярно к пленке, но в дальнейшем это для нас будет несущественно. Кроме того, вероятности $\vec{a}_{ij}(\vec{k}, \vec{k}')$ зависят от распределения нейтронов по поверхности пленки, и в дальнейшем мы будем считать это распределение однородным.

Матричные элементы $\vec{a}_{ij}(\vec{k}, \vec{k}')$ должны удовлетворять условиям детального равновесия:

$$d^3k k_{\perp} \vec{a}_{ij}(\vec{k}, \vec{k}') d^3k' = d^3k' k'_{\perp} \vec{a}_{ji}(\vec{k}, \vec{k}') d^3k, \quad /3/$$

смысл которых состоит в том, что пленка, будучи помещенной в изотропный и неполяризованный нейтронный газ, не должна приводить к возникновению поляризации или образованию потоков как в реальном, так и в импульсном пространствах. Соотношение /3/ справедливо, вообще говоря, только при отсутствии поглощения в пленке. В дальнейшем мы будем предполагать, что пленка достаточно тонкая, чтобы в ней можно было пренебречь поглощением, или будем считать, что поглощение входит единым множителем во все матричные элементы так, чтобы соотношение /3/ было справедливо и в этом случае.

В экспериментах с использованием метода времени пролета пропускание пленки описывается матрицей $\vec{a}_{ij}(\vec{k}, \vec{k}')$. При стационарном течении газа УХН матрицу необходимо усреднять по распределению падающих и проинтегрировать по распределению прошедших нейтронов:

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} \vec{b}_{++} & \vec{b}_{+-} \\ \vec{b}_{-+} & \vec{b}_{--} \end{pmatrix} = \int f(\vec{k}) d^3k k_{\perp} \vec{a}_{ij}(\vec{k}, \vec{k}') d^3k' / \int f(\vec{k}) d^3k k_{\perp}, \quad /4/$$

где $f(\vec{k})$ - соответствующие распределения справа или слева от пленки. При изотропном распределении с обеих сторон матричные элементы согласно /3/ должны удовлетворять условию $\vec{b}_{ij} = \vec{b}_{ji}$. Аналогично надо поступить в накопительном варианте, к рассмотрению которого мы переходим.

3. Схема установки приведена в /11/ на рис.2. УХН напускаются в накопительную камеру, выдерживаются в ней в течение определенного интервала времени, после чего выпускаются и направляются на детектор. Напуск и выпуск нейтронов может осуществляться через ферромагнитную пленку. В установке предусмотрена возможность поворачивать пленку на 180° , убирать ее и дополнять

другой пленкой. При напуске и выпуске УХН реверс спина производится спиновым флиппером на основе метода быстрого адиабатического прохождения, а во время выдержки - методами Раби и раздельных /во времени/ осциллирующих полей Рамзея.

Если какая-либо пленка вводится только при напуске или выпуске УХН, то измеряется величина ее пропускания:

$$T_1 = \frac{(\psi_0 \hat{R}_1 \psi_0)}{(\psi_0 \psi_0)} = \frac{(\psi_0 \hat{R}_1 \psi_0)}{(\psi_0 \psi_0)} = \frac{1}{2} (b_{++} + b_{+-} + b_{-+} + b_{--}), \quad /5/$$

где $\psi_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ - двухмерный вектор, описывающий неполяризованный пучок УХН /здесь и далее стрелочки над элементами b_{ij} матрицы \hat{R}_1 опущены/. Отметим, что $(\psi_0 \psi_0) = 2$. Поляризация нейтронов после прохождения пленки может быть представлена в следующем виде:

а/ при напуске:

$$p_1 = \frac{(\psi_0 \sigma_z \hat{R}_1 \psi_0)}{(\psi_0 \hat{R}_1 \psi_0)} = \frac{1}{2T_1} (b_{++} + b_{+-} - b_{-+} - b_{--}); \quad /6/$$

б/ при выпуске:

$$p_1' = \frac{(\psi_0 \sigma_z \hat{R}_1 \psi_0)}{(\psi_0 \hat{R}_1 \psi_0)} = \frac{1}{2T_1} (b_{++} + b_{-+} - b_{+-} - b_{--}) = \quad /7/ \\ = p_1 - \frac{b_{+-} - b_{-+}}{T_1},$$

где σ_z - матрица Паули. Для симметрической матрицы пропускания $p_1' = p_1$.

Если пленка остается внутри нейтроновода при напуске и выпуске УХН, то измеряется двухкратное пропускание:

$$T_{11} = \frac{(\psi_0 \hat{R}_1 Q \hat{R}_1 \psi_0)}{(\psi_0 \psi_0)}, \quad /8/$$

где матрица Q характеризует судьбу нейтрона в промежуточной области между поляризатором и анализатором. При наличии деполяризации в этой области с вероятностью f_1 и спинового флиппера с вероятностью переверота f_2 при напуске и f_3 при выпуске УХН соответственно матрицу Q можно представить в виде

$$Q = \frac{1}{2} (1 + \sigma_x) + \frac{1}{2} \phi (1 - \sigma_x), \quad /9/$$

где

$$\phi = \phi_1 \phi_2 \phi_3, \quad /10/$$

$$\phi_i = 1 - 2f_i, \quad i = 1, 2, 3; \quad /11/$$

σ_x - матрица Паули. Учитывая, что действие матриц $(1 \pm \sigma_x)$ на произвольный двухмерный вектор ψ можно представить следующим образом:

$$(1 + \sigma_x) \psi = \psi_0 (\psi_0 \psi), \quad /12/$$

$$(1 - \sigma_x) \psi = \sigma_z \psi_0 (\psi_0 \sigma_z \psi), \quad /13/$$

получим из /8/

$$T_{11} = T_1^2 (1 + \phi p_1^2). \quad /14/$$

Измерение величины T_{11} можно провести с выключенным флиппером ($\phi_2 = \phi_3 = 1$), а также включая его только при напуске ($\phi_2 \neq 1, \phi_3 = 1$) или при выпуске ($\phi_2 = 1, \phi_3 \neq 1$) или держа включенным и при напуске и при выпуске ($\phi_2 \neq 1, \phi_3 \neq 1$). Обозначая соответствующие счета детектора через $C_i, i = 1 \div 4$, получим ϕ_2, ϕ_3 и $\phi_1 p_1^2$:

$$\phi_2 = \frac{C_2 - C_4}{C_1 - C_3}, \quad /15/$$

$$\phi_3 = \frac{C_3 - C_4}{C_1 - C_2}, \quad /16/$$

$$\phi_1 p_1^2 = \frac{C_1 - C_2}{-\phi_2 C_1 + C_2 - \phi_3 C_1 + C_3} = \frac{C_1 - C_3}{C_1 C_4 - C_2 C_3} = \frac{(C_1 - C_2)(C_1 - C_3)}{C_1 C_4 - C_2 C_3}. \quad /17/$$

Так как флиппер один и тот же, то должны иметь место равенства $\phi_2 = \phi_3, C_2 = C_3$. Проводя такие же измерения с пленкой, повернутой на 180° , получим величину $\phi_1 p_1'^2$. Аналогичные измерения можно сделать с любой другой пленкой и определить для нее $\phi_1 p_2^2$ и $\phi_1 p_2'^2$.

Использование в измерениях двух пленок одновременно позволяет получить новую информацию. Рассмотрим, например, случай, когда при напуске стоит первая пленка, а при выпуске к ней добавляется вторая, причем таким образом, чтобы УХН на пути к детектору пересекали ее последней. Тогда измеряется трехкратное пропускание:

$$T_{112} = \frac{(\psi_0 \hat{R}_2 \hat{R}_1 Q \hat{R}_1 \psi_0)}{(\psi_0 \psi_0)}. \quad /18/$$

Обозначим двухмерный вектор $\hat{R}_1 Q \hat{R}_1 \psi_0$ через ψ и разложим его по полной системе ортогональных двухмерных векторов ψ_0 и $\sigma_z \psi_0$:

$$\psi = A \psi_0 + B \sigma_z \psi_0. \quad /19/$$

Умножая последовательно левую и правую части уравнения /19/ на ψ_0 и $\psi_0 \sigma_z$, найдем коэффициенты разложения:

$$A = T_{11}. \quad /20/$$

$$B = \frac{(\psi_0 \sigma_z \hat{R}_1 Q \hat{R}_1 \psi_0)}{(\psi_0 \psi_0)} = T_1^2 (p_1' + \phi p_1 s_1), \quad /21/$$

где введено обозначение:

$$s_1 = \frac{(\psi_0 \sigma_z \hat{R}_1 \sigma_z \psi_0)}{(\psi_0 \hat{R}_1 \psi_0)} = 1 - \frac{b_{+-} + b_{-+}}{T_1}. \quad /22/$$

Подставляя выражения /19-21/ в /18/, получим

$$T_{112} = T_1^2 T_2 [1 + \phi p_1 (p_1 + p_2 s_1) + p_1' p_2]. \quad /23/$$

Измеряя счет детектора при включенном и выключенном флиппере и зная $\phi_1 p_1^2$ и $\phi_1 p_2^2$ из предыдущих измерений, можно определить s_1 и $p_1' p_2$. Из комбинации известных величин $\phi_1 p_1^2$, $\phi_1 p_2^2$ и $p_1' p_2$ легко находим параметр деполяризации ϕ_1 . Это - первый новый результат использования трехкратного пропускания УХН через ферромагнитные пленки. Второй, более важный результат заключается в том, что теперь нам известны величины T_1 , p_1 , p_1' и s_1 , являющиеся независимыми линейными комбинациями матричных элементов b_{ij} первой пленки, что позволяет однозначно их определить. Если первую и вторую пленку поменять ролями, то может быть определена матрица пропускания и второй пленки.

Отметим возможность получения избыточной информации при определении матрицы одной пленки /например, измерение T_{12} и T_{212} при различных состояниях флиппера/, которая будет полезна для перепроверки результатов. Широкие возможности дает использование анализа по методу времени пролета выпускаемых из камеры нейтронов для исследования влияния пространственного и скоростного распределений УХН и переотражений между пленками на получаемые результаты.

Отметим еще одну экспериментальную возможность, появляющуюся в накопительном эксперименте, а именно, исследование деполяризации УХН при их движении в неоднородном магнитном поле, которое накладывается на накопительную камеру. Параметр деполяризации по аналогии с /10/ можно представить в виде

$$\phi_1 = \vec{\phi}_H \vec{\phi}_k \vec{\phi}_H, \quad /24/$$

где $\vec{\phi}_H$ и $\vec{\phi}_k$ - эффективности переворота спина нейтрона, выражаемые согласно /11/ через вероятности переворота f_H и f_k в нейтроноводе при напуске /выпуске/ и в камере при выдержке соответственно. Вероятность f_k линейно зависит от времени выдержки t /13/:

$$f_k = wt, \quad /25/$$

где w - вероятность переворота в единицу времени, определяемая величиной и средними размерами /корреляционной длиной/ областей неоднородностей магнитного поля в камере. Так как нейтроны при напуске и выпуске проходят через один и тот же нейтроновод, то с учетом /25/ имеем /при $wt \ll 1$ /

$$\phi_1 = \phi_H^2 (1 - 2wt). \quad /26/$$

Измеряя зависимость $\phi_1(t)$ и описывая ее уравнением /26/, можно найти значения ϕ_H и w . Абсолютное определение последней величины открывает возможность экспериментального исследования деполяризации УХН при их движении в неоднородном магнитном поле и сопоставления опытных данных с теоретическими результатами /13/.

4. Рассмотрим различные факторы, приводящие к деполяризации. Если доля α пленки намагничена в направлении, противоположном остальной ее части /неполная намагниченность/, то матрица пропускания имеет вид

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1-\alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{pmatrix}. \quad /27/$$

При наличии в пленке сквозных отверстий, общая площадь которых составляет y от площади пленки, матрица равна

$$R_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & y \end{pmatrix}. \quad /28/$$

Наконец, если деполяризация происходит на или вблизи поверхности пленки, то ее матрица пропускания может быть представлена в виде

$$\vec{R}_3 = Q_2 R_0 Q_1; \quad \vec{R}_3 = Q_1 R_0 Q_2, \quad /29/$$

где $R_0 = \frac{1}{2} (1 + \sigma_z)$ - матрица пропускания идеальной пленки,

$$Q_i = (1 - \beta_i) I + \beta_i \sigma_x, \quad i = 1, 2; \quad /30/$$

I - единичная 2×2 матрица, β_i - вероятность переворота, определяемая либо неоднородностями, либо неколлинеарностью внутреннего и внешнего полей на соответствующей стороне пленки.

Если действуют все три механизма деполаризации, то их можно описать единой матрицей пропускания:

$$\vec{R} = (1 - \gamma) [(1 - \alpha) \vec{R}_3 + \alpha \vec{R}'_3] + \gamma I, \quad /31/$$

где матрица \vec{R}'_3 получается заменой матрицы R_0 в /29/ на матрицу $R'_0 = \frac{1}{2}(1 - \sigma_z)$. Матрица /31/ содержит четыре параметра: α , β_1 , β_2 и γ , которые могут быть определены из известных матричных элементов. Таким образом, оказывается возможным найти вклад каждого из названных механизмов в процесс деполаризации.

Вообще говоря, в матрицу /31/ необходимо еще включить поглощение. Это - пятый параметр, который из четырех уравнений определить нельзя. Однако, если с помощью дополнительных измерений определить площадь отверстий в пленке, то параметр γ можно считать известным, и тогда поглощение можно рассматривать как четвертый параметр, который определяется из эксперимента.

5. Практическая ценность предлагаемых исследований заключается в том, что, определив вклад наиболее важного механизма деполаризации, мы можем контролировать влияние технологии изготовления пленки на этот механизм и тем самым подбирать наилучшую технологию для изготовления поляризаторов УХН, магнитных затворов и прерывателей. Можно надеяться также, что предлагаемая методика окажется полезной для изучения влияния различных внешних факторов на магнитные свойства тонких пленок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров А.И. и др. ЯФ, 1974, 19, с.300.
2. Алтарев И.С. и др. Препринт ЛИЯФ, №430, Л., 1978.
3. Altarev I.S. et al. Phys.Lett., 1981, 102B, p.13.
4. Herdin R. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1978, 148, p.353.
5. Степанов А.В., Шелагин А.В. Краткие сообщ. по физике, 1977, №9, с.37.
6. Игнатович В.К. Письма в ЖЭТФ, 1978, 28, с.311.
7. Лобашов В.М., Серебров А.В. В кн.: III Межд. школа по нейтронной физике. ОИЯИ, ДЗ-11787, Дубна, 1978, с.225.
8. Steyerl A. Там же, с.209.
9. Покотиловский Ю.Н. ОИЯИ, РЗ-11823, Дубна, 1978.
10. Byrne J. Nucl.Instr. and Meth., 1979, 167, p.355.
11. Таран Ю.В. ОИЯИ, РЗ-9307, Дубна, 1975.
12. Таран Ю.В. ОИЯИ, РЗ-7147, Дубна, 1973.
13. Ефимов В.Н., Игнатович В.К. ОИЯИ, Р4-8253, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 июня 1982 года.

Игнатович В.К., Таран Ю.В. РЗ-82-440
Возможность экспериментального исследования матрицы пропускания ультрахолодных нейтронов ферромагнитными пленками

Рассмотрено пропускание ультрахолодных нейтронов /УХН/ через тонкие ферромагнитные пленки. Исследован накопительный вариант анализа поляризации УХН с использованием двух пленок. Показана возможность экспериментального определения матрицы пропускания пленок на основе измерений одно-, двух- и трехкратного прохождения УХН через них. Предложена процедура нахождения параметров, характеризующих конкретные механизмы деполаризации при пропускании УХН через пленку, из матричных элементов, определенных на опыте.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Ignatovich V.K., Taran Yu.V. РЗ-82-440
On a Possibility of Experimental Investigation of Ultracold Neutron Transmission Matrices for Ferromagnetic Films

The transmission of ultracold neutrons (UCN) through thin ferromagnetic films is considered. The storage variant of UCN polarization analysis by using two films is investigated. The possibility is indicated of experimental determination of transmission matrices of films from measurements of one-, two- and three-time passing of UCN through them. The procedure of determining the parameters, characteristic of specific depolarization mechanisms at the transmission of UCN through a film, from matrix elements, determined experimentally, is proposed.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.