

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

3760/2-80

11/8-80
P3-80-350

Д.А.Корнеев, В.А.Кудряшев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СПИН-ФЛИППЕРА
С ПРОТЯЖЕННОЙ РАБОЧЕЙ ОБЛАСТЬЮ

Submitted to "Nuclear Instruments and Methods"

1980

1. ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах с поляризованными тепловыми нейтронами длительное время используется спин-флиппер Драркина^{/1,2,3/}, основанный на прохождении нейтроном точки нулевого поля. Такой спин-флиппер, как правило, применяется при исследованиях на пучках с малым поперечным сечением. Недавно был предложен новый спин-флиппер для немонахроматических пучков нейтронов с областью нулевого поля в виде линии^{/4/}. Рабочая область такого спин-флиппера лежит в окрестности этой линии. Это практически полностью снимает ограничение на один из размеров поперечного сечения пучка нейтронов и позволяет существенно поднять светосилу установок, использующихся в поляризационных экспериментах. В работах^{/4,5/} обсуждался вопрос об особенностях функции вероятности реверса спина для данного спин-флиппера и о возможности ее экспериментального определения.

В настоящей статье сообщаются результаты экспериментальной проверки работоспособности спин-флиппера с протяженной рабочей областью^{/4/}. Рабочий вариант спин-флиппера создан в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

2. КОНСТРУКЦИЯ СПИН-ФЛИППЕРА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Конструкция рабочего варианта спин-флиппера схематически показана на рис. 1а. Он состоит из двух основных катушек /1/ в виде прямоугольных рамок размером 150×250 мм². Каждая из рамок имеет катушку сечением 40×30 мм² из пятисот витков. Рамки расположены в плоскости XY, перпендикулярной оси пучка. Для подавления H_x -компоненты рассеянного поля мы использовали компенсирующие катушки /2/ диаметром 250 мм. Несложное устройство позволяло изменять расстояние между рамками, а также передвигать всю конструкцию как целое поперек пучка вдоль осей X и Y. Каждая из рамок подключалась к отдельному источнику тока с регулировкой в пределах от 0 до 3 А. В режиме реверса рамки включались таким образом, что направления токов в их ближайших сторонах совпадали. На рис. 2 показаны результаты измерения H_y -компоненты поля спин-флиппера при значении тока в рамках, равном 2,6 А, и расстоянии между рамками 58 мм. Причины, приводящие к взаимному реверсу спина и магнитного поля при про-

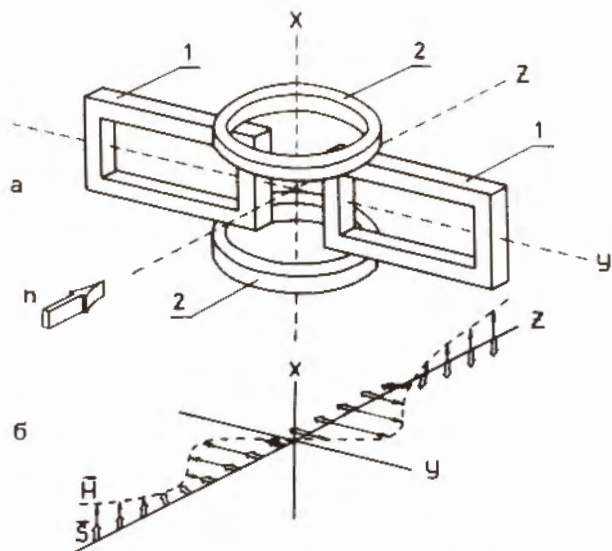


Рис.1. а - спин-флиппер с протяженной рабочей областью. 1 - токовые рамки, 2 - компенсирующие катушки. Стрелкой показано направление нейтронного пучка. б - поведение векторов спина \vec{S} и магнитного поля \vec{H} при включенном спин-флиппере.

хождении нейтрона через спин-флиппер в направлении оси Z, подробно обсуждались в^{4/}. На рис.1б схематически показано поведение векторов спина и магнитного поля на участке траектории между поляризатором и анализатором при включенном спин-флиппере /режим реверса/. В режиме проведения спина спин-флиппер и компенсирующие катушки выключались, а проведение осуществлялось в рассеянных полях магнитов поляризатора и анализатора.

3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Спин-флиппер был установлен на пучке поляризованных тепловых нейтронов, его основные элементы кратко описаны в работе^{6/}. Узкий канал, собранный из многослойных CoFe поляризирующих зеркал^{7/}, служил поляризатором и позволял получать за счет многократных отражений пучок нейтронов со степенью поляризации, близкой к единице. В качестве анализатора поляризации использовалось эталонное CoFe зеркало, которое размещалось на рас-

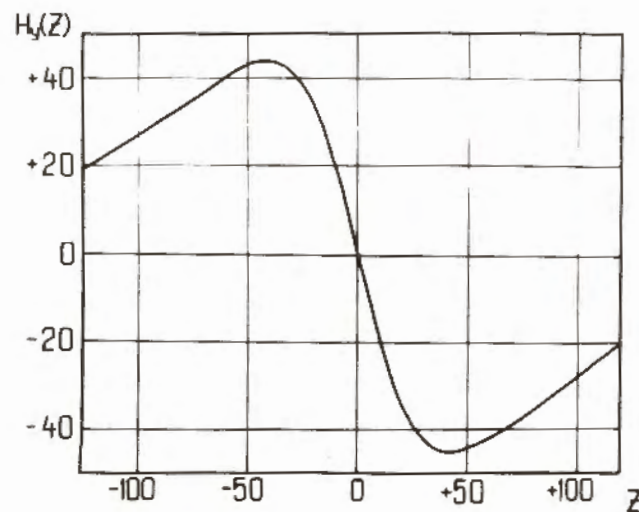


Рис.2. Измеренная зависимость H_y -компоненты магнитного поля спин-флиппера в плоскости XZ от z-координаты. Расстояние между рамками - 58 мм, ток в рамках - 2,6 А, H_y - Э, z - мм.

стоянии 1,4 метра от поляризатора. Напряженность магнитных полей магнитов поляризатора и анализатора составляла 480 Э. Спин-флиппер помещался на половине расстояния между поляризатором и анализатором. Значение тока в рамках спин-флиппера, которое в режиме реверса оставалось постоянным при всех измерениях, было выбрано равным 2,6 А. Ширина нейтронного пучка Δy в области спин-флиппера была равна 0,5 мм, высота пучка Δx составляла 22 мм. Ось пучка имела направление, совпадающее с осью Z /см. рис.1/.

4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Во всех случаях измерялось так называемое γ -отношение, которое выражается через интенсивности нейтронов после анализатора при включенном (N_-) и выключенном (N_+) спин-флиппере следующим образом:

$$\gamma = \frac{N_- - \text{фон}}{N_+ - \text{фон}}$$

/1/

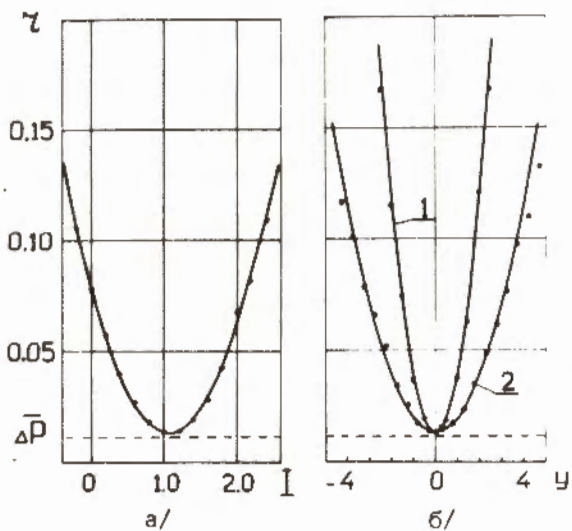


Рис.3. а - зависимость γ -отношения от тока I в компенсирующих катушках, расстоянии между рамками - 58 мм, $I - A$; б - зависимость γ -отношения от y -координаты центра нейтронного пучка, y - мм. Кривые 1 и 2 соответствуют расстоянию между рамками 58 и 150 мм. Пунктиром показано значение $\Delta P = 1,23 \cdot 10^{-2}$, полученное после обработки кривых 1 и 2.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

а/ При измерении зависимости γ -отношения от x -координаты центра пучка /рис.1/, последний пропусклся между рамками спин-флиппера /в этом случае плоскость пучка совпадала с плоскостью xz , т.е. значение y -координаты пучка равнялось нулю/. Изменяя вертикальное положение спин-флиппера в пределах ± 30 мм, мы не наблюдали изменений γ -отношения ($\gamma \sim 1,3 \cdot 10^{-2}$). Эти измерения подтвердили отсутствие зависимости вероятности реверса спина от вертикального размера пучка в указанных пределах. Отметим, что ограничения на вертикальный размер пучка все-таки существуют по той причине, что не удается создать однородной вдоль оси X компенсации H_x -компоненты рассеянного поля. Это связано во-первых, с зависимостью H_x от x -координаты и, во-вторых, с ограниченными размерами компенсирующих катушек. Примечательным оказалось и то, что поворот всего спин-флиппера вокруг оси x в пределах $\pm 20^\circ$ также не влиял на величину γ -отношения.

б/ Зависимость γ -отношения от величины тока в компенсирующих катушках, т.е. от H_x -компоненты магнитного поля, показана на рис.3а. Минимальное значение γ -отношения соответствует наилучшей компенсации H_x -компоненты рассеянного поля в пределах высоты пучка $\Delta x = 22$ мм. В этих измерениях подтвердилась квадратичная зависимость функции Δf от H_x .

в/ Результаты измерения зависимости γ -отношения от y -координаты центра пучка показаны на рис.3б. Измерения проведены при расстояниях между рамками 58 мм /кривая 1/ и 150 мм /кривая 2/. Отметим, что увеличение расстояния между рамками приводило к уменьшению градиента $\partial H_y / \partial z$ ведущего магнитного поля в области спин-флиппера. Измерения функции $\gamma(y)$ показали, что вероятность реверса падает пропорционально квадрату отклонения центра пучка от оси X спин-флиппера. Подгонка измеренных значений $\gamma_1(y)$ и $\gamma_2(y)$ параболой $\bar{a}_1 y^2 + c_1$ /кривая 1/ и $\bar{a}_2 y^2 + c_2$ /кривая 2/ дала следующие значения коэффициентов парабол: $\bar{a}_1 = 2,71 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^{-2}$, $c_1 = 1,30 \cdot 10^{-2}$, $\bar{a}_2 = 0,65 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^{-2}$, $c_2 = 1,30 \cdot 10^{-2}$. На основе полученных коэффициентов при использовании способа обработки экспериментальных данных, описанного в [5], были определены величины $\Delta P = \frac{1}{2}(\Delta P_p + \Delta P_A)$, Δf_1 и Δf_2 при ширине пучка $\Delta y = 0,5$ мм и средней длине волны в спектре $\bar{\lambda} = 1,96$ А:

$$\overline{\Delta P} = (1,23 \pm 0,01) \cdot 10^{-2},$$

$$\overline{\Delta f_1} = (0,07 \pm 0,01) \cdot 10^{-2},$$

$$\overline{\Delta f_2} = (0,07 \pm 0,01) \cdot 10^{-2}.$$

/3/

Если обозначить $1 - P_p = \Delta P_p$, $1 - P_A = \Delta P_A$ и $1 - f = \Delta f$, где P_p и P_A - поляризующие способности поляризатора и анализатора, а f - вероятность реверса спина с помощью спин-флиппера, то для γ -отношения справедлива следующая формула [5]:

$$\gamma = \frac{1}{2} (\overline{\Delta P_p} + \overline{\Delta P_A}) + \overline{\Delta f}, \quad /2/$$

где черта сверху означает усреднение по эффективному спектру нейтронов, а величины $\overline{\Delta P_p}$ и $\overline{\Delta P_A} \ll 1$. В нашем случае условие $\overline{\Delta P_p}$, $\overline{\Delta P_A} \ll 1$ хорошо выполнялось. Основными параметрами, от которых зависит функция Δf , изучению которой посвящена данная работа, являются [5,8,9]:

а/ величина градиента магнитного поля $\frac{\partial H_y}{\partial z}$ в области спин-флиппера;

б/ величина рассеянного магнитного поля H_x в области спин-флиппера;

в/ x - и y -координаты прохождения пучка нейтронов через спин-флиппер.

Для определения функции $\overline{\Delta f}$ измерялась зависимость γ -отношения от перечисленных выше параметров при фиксированных значениях $\overline{\Delta P_p}$ и $\overline{\Delta P_A}$.

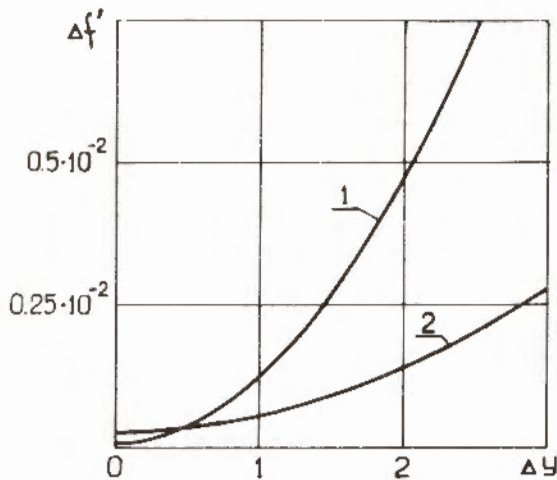


Рис. 4. Зависимость $\Delta f'$ спин-флиппера от ширины нейтронного пучка Δy - мм. Кривая 1 соответствует расстоянию между рамками 58 мм, кривая 2 - 150 мм.

Часть в γ -отношении, связанная с поляризатором и анализатором, отмечена на рис. 3 пунктиром.

Найденные коэффициенты \bar{a}_1 , \bar{a}_2 , c_1 , c_2 позволяют по-

строить функции $\Delta f_1(\lambda, \Delta y)$ и $\Delta f_2(\lambda, \Delta y)$:

$$\Delta f_1(\lambda, \Delta y) = \lambda \cdot \Delta f'_1(\Delta y) = \lambda \cdot (0,115 \cdot \Delta y^2 + 0,007) \cdot 10^{-2},$$

/4/

$$\Delta f_2(\lambda, \Delta y) = \lambda \cdot \Delta f'_2(\Delta y) = \lambda \cdot (0,028 \cdot \Delta y^2 + 0,033) \cdot 10^{-2}.$$

где λ - длина волны нейтрона в \AA , Δy - ширина пучка в мм. Полученные функции $\Delta f_1(\lambda, \Delta y)$ и $\Delta f_2(\lambda, \Delta y)$ позволяют предсказать значения вероятности реверса спина нейтронов с помощью спин-флиппера /для выбранных нами расстояний между рамками 58 и 150 мм/ для произвольных геометрических или спектральных характеристик пучка. На рис. 4 показаны функции $\Delta f'_1(\Delta y)$ /кривая 1/ и $\Delta f'_2(\Delta y)$ /кривая 2/, полученные из формулы /4/. На основании приведенных кривых можно сделать вывод о том, что для пучков с шириной $\Delta y < 0,5$ мм значения вероятности реверса для сдвинутых рамок будут выше, чем для раздвинутых. Однако для пучков с $\Delta y > 0,5$ мм широко поставленные рамки предпочтительнее. Разница в эффективности спин-флиппера для расстояний между рамками 58 мм и 150 мм будет быстро расти с увеличением ширины пучка.

6. О СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

Выше мы использовали формулу для $\Delta f(\lambda)$, полученную в предположении линейной зависимости Δf от $\lambda^{1/5}$. В целях экспериментальной проверки такой зависимости были проведены спект-

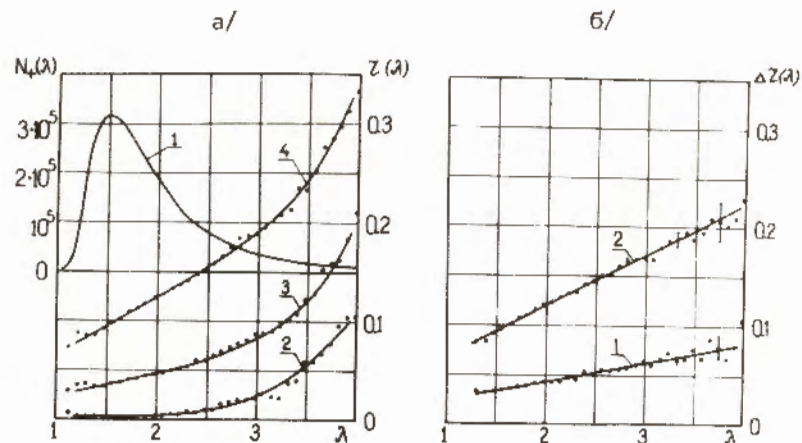


Рис. 5. а - спектр нейтронного пучка $N_+(\lambda)$ при выключенном спин-флиппере - кривая 1. Кривые 2, 3 и 4 - спектральные зависимости $\gamma(\lambda)$ -отношений для 3-х значений $\Delta f'$ спин-флиппера, полученные при значениях тока в компенсирующих катушках 1 А; 0,2 А и -0,4 А соответственно. б - зависимости $\Delta \gamma(\lambda)$, полученные на основании кривых 2, 3 и 4 рис. 5а.

ральные измерения γ -отношения по методу времени пролета. Если представление $\Delta f(\lambda) = \lambda \cdot \Delta f'$ справедливо, тогда для двух разных значений $\Delta f'_1$ и $\Delta f'_2$ спин-флиппера мы получим две спектральные зависимости γ -отношения:

$$\gamma_1(\lambda) = \Delta P(\lambda) + \lambda \cdot \Delta f'_1,$$

/5/

$$\gamma_2(\lambda) = \Delta P(\lambda) + \lambda \cdot \Delta f'_2.$$

Тогда можно утверждать, что

$$\Delta \gamma(\lambda) = \gamma_1(\lambda) - \gamma_2(\lambda)$$

будет линейной функцией длины волны.

На рис. 5а кривой 1 показан спектр нейтронного пучка $N_+(\lambda)$ при выключенном спин-флиппере. Было измерено три зависимости $\gamma(\lambda)$ при трех различных значениях $\Delta f'$. Эти зависимости показаны кривыми 2, 3 и 4. Изменение $\Delta f'$ достигалось за счет изменения тока компенсирующих катушек. На рис. 5б приведены значения функций $\Delta \gamma(\lambda)$, полученные как разность значений $\gamma(\lambda)$,

соответствующих кривым 2, 3 и 4 рис.5а. На основании полученных зависимостей $\Delta \Gamma(\lambda)$ можно утверждать, что линейная зависимость вероятности реверса хорошо соблюдается вплоть до 4 Å.

7. О ФОРМУЛЕ ВЕРОЯТНОСТИ РЕВЕРСА СПИНА

При выводе зависимости $f(y, \lambda)$ для спин-флиппера в^{5/} использовалась общая формула вероятности реверса спина при прохождении через точку нулевого магнитного поля, полученная в работах^{8,9/}. Размерный коэффициент, входящий в выражение для f и обозначенный в^{5/} через ϵ , равен $2,52 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\mu_n \pi}{\hbar} = 0,726 \cdot 10^{-2} / \text{Å} \cdot \text{Э} \cdot \text{мм} / ^{-1}$. Экспериментально измеренная величина $\bar{a}_1 = 2,71 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^{-2}$ выражается через градиент ведущего магнитного поля $\frac{\partial H_y}{\partial z} \left(\frac{\text{Э}}{\text{мм}} \right)$ и среднюю длину волны нейтрона $\bar{\lambda} (\text{Å})$ следующим образом^{5/}:

$$\bar{a}_1 = \epsilon \cdot \bar{\lambda} \left(\frac{\partial H_y}{\partial z} \right)_1 \quad /6/$$

Подставив сюда значения ϵ , $\bar{\lambda} = 1,96 \text{ Å}$, $(\partial H_y / \partial z)_1 = 1,91 \frac{\text{Э}}{\text{мм}}$, получим значение $\bar{a}_1 = 2,72 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^{-2}$, предсказываемое теорией. Таким образом, имеется хорошее согласие в значениях \bar{a}_1 , полученного экспериментально и рассчитанного по формуле /6/. На этом основании можно сделать вывод о том, что формула для вероятности реверса спина f , полученная в работах^{8,9/}, дает хорошее количественное согласие с экспериментально полученными результатами. В связи с этим уместно заметить, что в литературе отмечалось расхождение экспериментально измеренного значения f с ожидаемым по теории^{10/}.

8. ВЫВОДЫ

- а/ В работе экспериментально доказана работоспособность спин-флиппера с областью нулевого поля в виде линии.
 б/ Показано, что данный спин-флиппер отличается высокой эффективностью переворота спина нейтрона в широком диапазоне длин волн для нейтронных пучков с сечением вытянутой формы.
 в/ Подтверждено предложенное ранее аналитическое описание особенностей спин-флиппера, а именно: квадратичное падение вероятности реверса спина с увеличением ширины пучка и величины

рассеянного поля, а также пинейный спад вероятности реверса с увеличением длины волны нейтрона.

г/ Экспериментально подтверждена возможность выделения вклада в Γ -отношение от спин-флиппера; доказана возможность абсолютного определения эффективности спин-флиппера независимо от спектра и ширины нейтронного пучка.

д/ Показано, что формула для вероятности реверса спина нейтрона при прохождении через нулевую точку магнитного поля дает хорошее количественное согласие с экспериментом.

В заключение авторы благодарят Ю.М.Останевича, В.А.Трунова, А.Ф.Щебетова за интерес к работе и всестороннюю поддержку, Ю.В.Тарана, Ю.Лаукнера за полезные замечания, А.П.Булкина, В.П.Харченкова за помощь при проведении измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Драбкин Г.М. и др. Препринт ФТИ АН СССР, № 183, 1969.
2. Драбкин Г.М. и др. ЖЭТФ, 1969, 29, с.261.
3. Liard P., Steinberg R.I., Vignon B. Nucl.Instr. and Meth., 1975, 125, p.7,8.
4. Корнеев Д.А. ОИЯИ, P13-12362, Дубна, 1979; Nucl.Instr. and Meth., 1980, 169, p.65,69.
5. Корнеев Д.А. ОИЯИ, P3-80-65, Дубна, 1980.
6. Щебетов А.Ф. и др. Препринт ЛИЯФ, № 373, 1977.
7. Драбкин Г.М. и др. Препринт ЛИЯФ, № 182, 1975; ЖЭТФ, 1975, 69, № 12, с.1916.
8. Majorana E. Nuovo Cim., 1932, 9, p.43.
9. Владимирский В.В. ЖЭТФ, 1960, 39, с.1062.
10. Frisch R., Segre E. Zs.f.Phys., 1933, 80, p.610-616.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 мая 1980 года.