

*ПРЕЗЕНТАЦИЯ КУРСА ЛЕКЦИЙ  
"ТЕХНИКА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ  
НЕЙТРОНОВ",  
2 КУРС МАГИСТРАТУРЫ СПбГУ.*

**С.В. Григорьев**

# Лекция 1

## Вместо введения. История школы поляризованных нейтронов.



С.В. Малеев

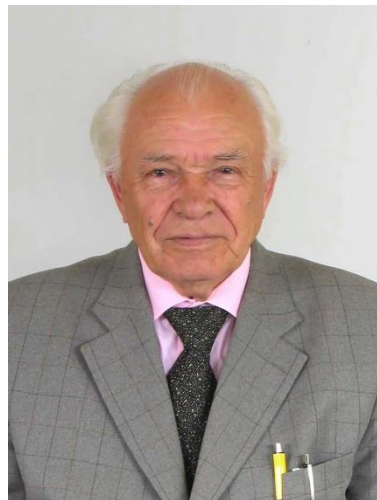
Теория рассеяния  
поляризованных  
нейтронов



Г.М. Драбкин

1922 - 2014

Техника поляризованных  
нейтронов, магнитный  
монокроматор («ГД»),  
спин-флиппер («ФД»)



А.И. Огороков

Трехмерный анализ  
поляризации,  
асимметрия  
рассеяния  
поляризованных  
нейтронов



В.П. Плахтий


1939 - 2009  
Спиновая  
киральность и  
поляризованные  
нейтроны

# Лекция 1

Литература:

[1] А.И. Окорочков, Обзор достижений школы по физике поляризованных нейтронов в Гатчине, Поверхность, 2016.

[2] Труды Школы ФПН-2014.



ИИЦ Курчатовский Институт Петербургский институт ядерной физики  
Школа ФПН-2014  
Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет

**III ШКОЛА ПО ФИЗИКЕ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
ИМ. Б. П. КОНСТАНТИНОВА

$\sigma_{\text{сн}}(\mathbf{Q}, \omega) = \frac{2}{\pi} \frac{k_T}{k_i} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\omega}{T}\right) \right]^{-1} [rF(\mathbf{Q})]^2 P_0 \times$   
 $\times [(\hbar Q)^2 \text{Im } C_H(Q, \omega) + (\hbar Q)(\hbar c)(\hbar) \text{Im } C_{HY}(\mathbf{Q}, \omega)]$

$\frac{d\sigma}{d\Omega} = [rF(\mathbf{Q})]^2 \left\{ [1 + (\hbar Q)^2] \times \right.$   
 $\times \left[ \frac{1}{(\mathbf{q} + z\hat{n})^2 + \kappa_z^2} + \frac{1}{(\mathbf{q} - z\hat{n})^2 + \kappa_z^2} \right] +$   
 $\left. + 2(P_0 \hbar Q)(\hbar c) \left[ \frac{1}{(\mathbf{q} + z\hat{n})^2 + \kappa_z^2} - \frac{1}{(\mathbf{q} - z\hat{n})^2 + \kappa_z^2} \right] \right\}, \quad \frac{d\mathbf{P}}{dt} = -2\mu_n [\mathbf{B}(\mathbf{r}) \times \mathbf{P}]$

$\alpha = \frac{d\theta}{ZT_c}, \quad \kappa_z^2 = \kappa^2 - \alpha^2.$

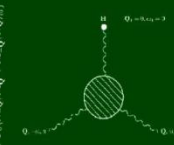
**12 ДОСТИЖЕНИЙ ШКОЛЫ ПО ФИЗИКЕ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ**

$\mathbf{P}\sigma(\mathbf{Q}, \omega) = T(\mathbf{Q}, \omega) \mathbf{P}_0 + \Sigma_1(\mathbf{Q}, \omega)$

$\sigma(\mathbf{Q}, \omega) = \frac{1}{\pi} \frac{k_T}{k_i} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\omega}{T}\right) \right]^{-1} \times$   
 $\times \{ [N_0 - N_0^*] \text{Im } C_H(\mathbf{Q}, \omega) + 2\kappa^2 \text{Im } C_{HY}(\mathbf{Q}, \omega) +$   
 $+ P_0 (\delta_{\mathbf{q}, \mathbf{0}} \delta_{\omega, 0} M_0^z + M_{-q, -\omega}^z) \}$

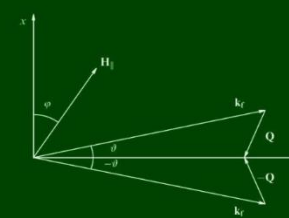
$Q = k \left[ \vartheta^2 + \left( \frac{\omega}{2E} \right)^2 \right]^{1/2},$   
 $Q_x = 2E\vartheta [(2E\vartheta)^2 + \omega^2]^{-1/2},$   
 $Q_z = \omega [(2E\vartheta)^2 + \omega^2]^{-1/2}.$

$M_Q^L = rN^{-1/2} \sum_m \exp(i\mathbf{Q}\mathbf{R}_m) \mathbf{L}_m(\mathbf{Q}),$   
 $\mathbf{L}_m(\mathbf{Q}) = \int d\tau \psi_m^*(\tau) \sum_j \mathbf{I}_j(\mathbf{Q}) \psi_j(\tau),$   
 $\mathbf{I}_j(\mathbf{Q}) = \frac{1}{2} [\mathbf{I}_j h(i\mathbf{Q}\mathbf{r}_j) + h(i\mathbf{Q}\mathbf{r}_j) \mathbf{I}_j].$



$N_0 = N_0^* N_0 + M_{-q, -\omega}^z M_0^z + P_0 (\delta_{\mathbf{q}, \mathbf{0}} M_0^z + M_{-q, -\omega}^z) +$   
 $+ (P_0 \delta_{\mathbf{q}, \mathbf{0}} M_0^z + M_{-q, -\omega}^z) \delta_{\omega, 0}$   
 $P_{02} = N_0^* \alpha_0 P_0 + M_{-q, -\omega}^z (M_0^z P_0) + (P_0 M_{-q, -\omega}^z M_0^z +$   
 $+ M_{-q, -\omega}^z M_0^z P_0 - \delta_{\mathbf{q}, \mathbf{0}} (M_{-q, -\omega}^z M_0^z \delta_{\omega, 0} + N_0^* M_0^z$   
 $+ M_{-q, -\omega}^z N_0^*) + [N_0^* \alpha_0 M_0^z - M_{-q, -\omega}^z \alpha_0] \times P_0$

**Гатчина**  
**2014**



$V(\mathbf{r}) = -\mu_n \sigma \mathbf{B}(\mathbf{r})$

# Лекция 1



<http://oiks.pnpi.spb.ru/events/fpn-2017>

**VI Школа по физике поляризованных нейтронов**

14 - 15 декабря 2017 года

Гатчина, Орлова Роща, НИЦ КИ ПИЯФ



# Лекция 2

Получение пучка  
поляризованных нейтронов.

Определение эффективности  
работы компонентов установки  
поляризованных нейтронов



# Лекция 2

## Методика эксперимента

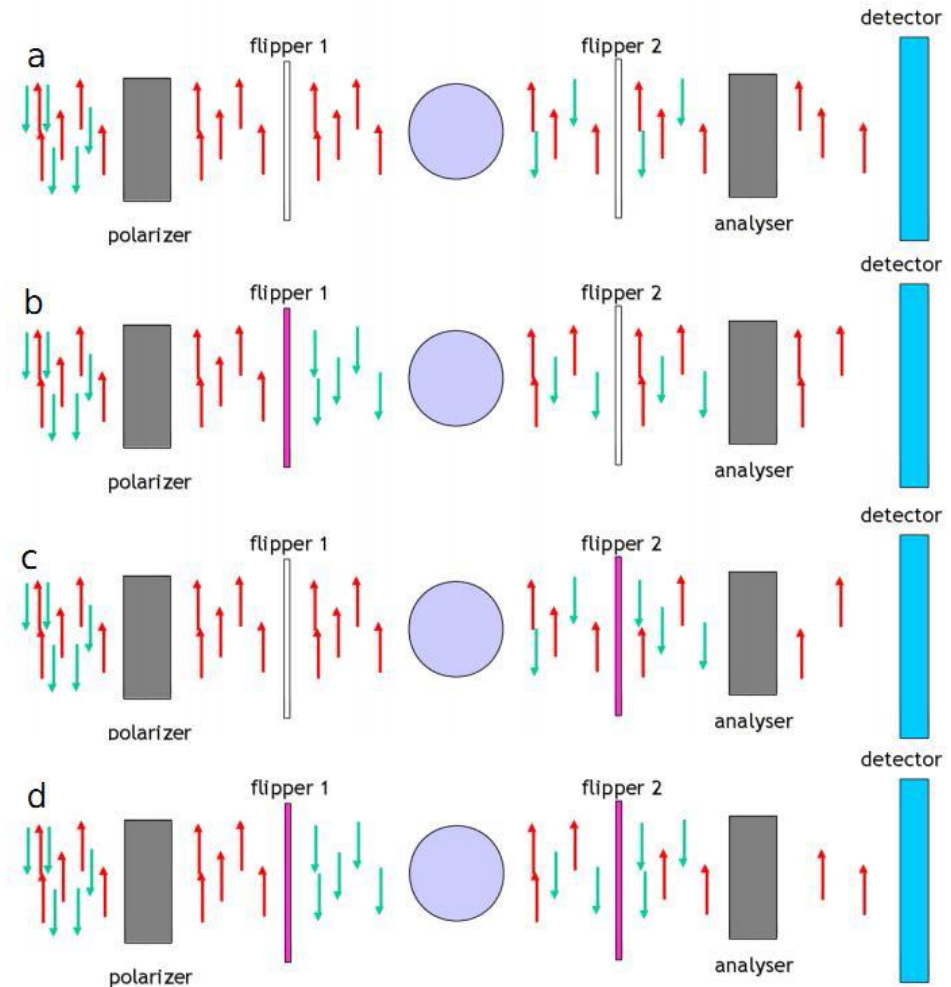
$$I^{\uparrow\uparrow} = A,$$

$$I^{\downarrow\uparrow} = A\epsilon + B(1 - \epsilon),$$

$$I^{\uparrow\downarrow} = A\epsilon' + B(1 - \epsilon'),$$

$$I^{\downarrow\downarrow} = A - (A - B)\epsilon_{\text{eff}}.$$

$$P = \frac{A - B}{A + B},$$



# Лекция 2

## Расчет ошибки измерения поляризации

Если интенсивность измерена как число событий  $N_p$ , то ее ошибка равна  $I_p^{1/2}$ , а для  $N_o$  ошибка равна  $I_o^{1/2}$

Посчитаем ошибку поляризации

$$P = (N_o - N_p) / (N_p + N_o) .$$

$$\Delta P = [(\delta P / \delta N_o)^2 (\Delta N_o)^2 + (\delta P / \delta N_p)^2 (\Delta N_p)^2]^{1/2}$$

$$\delta P / \delta N_o = 2N_p / (N_p + N_o)^2 ,$$

$$\delta P / \delta N_p = -2N_o / (N_p + N_o)^2$$

$$\Delta P = [4N_p N_o / (N_p + N_o)^3]^{1/2}$$

# Лекция 2

## Лабораторная работа

Проведем лабораторную работу.

Подбросим монету 10 раз. Отметим, сколько раз получился «орел», а сколько - «решка». Запишем.

Посчитаем поляризацию.

Повторим процедуру 10 раз.

Заметим, что поляризация ни в одном измерении не равна нулю!

Подсчитаем средне-квадратичное отклонение  $\Delta N$ .

Повторим для  $N=100$ .

Подбросим монету 100 раз. Отметим, сколько раз получился «орел», а сколько - «решка». Запишем.

Посчитаем поляризацию.

Повторим процедуру 10 раз.

Заметим, что поляризация в этих измерениях близка к нулю!

Подсчитаем средне-квадратичное отклонение  $\Delta N$ .

Оказывается, что чем больше измерений мы сделали, чем больше  $N$ , тем точнее измерена поляризация.



# Лекция 3

## Спин нейтрона. Теоретическое представление поляризации нейтронов.

Литература:

[1] С.В. Малеев, Лекция 1. <http://lns.pnpi.spb.ru/netschool/>

Поляризация –  $t$ -нечетный аксиальный вектор

# Лекция 3

Сечение нейтронов зависит от поляризации!

$$\begin{aligned}\sigma_{\mathbf{Q}} = & \mathbf{N}_{-\mathbf{Q}}\mathbf{N}_{\mathbf{Q}} + \mathbf{M}_{-\mathbf{Q}}^{\perp}\mathbf{M}_{\mathbf{Q}}^{\perp} + \\ & + \mathbf{P}_0(N_{-\mathbf{Q}}\mathbf{M}_{\mathbf{Q}}^{\perp} + \mathbf{M}_{-\mathbf{Q}}^{\perp}N_{\mathbf{Q}}) + \\ & + i(\mathbf{P}_0\hat{\mathbf{Q}})([\mathbf{M}_{-\mathbf{Q}} \times \mathbf{M}_{\mathbf{Q}}]\hat{\mathbf{Q}})\end{aligned}$$

ядерное и магнитное  
сечения рассеяния

ядерно-магнитная  
интерференция

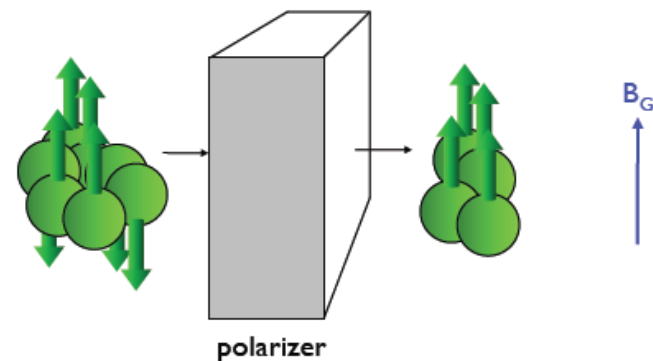
киральное магнитное  
сечение рассеяния

# Лекция 4

## Поляризаторы нейтронов

Все поляризаторы нейтронов «работают» потому, что сечение рассеяния нейтронов зависит от их поляризации.

- 1) метод пропускания пучка сквозь намагниченный до насыщения ферромагнетик
- 2) метод поляризации нейтронов магнитными кристаллами.
- 3) метод отражения от намагниченных зеркал.
- 4) метод поляризации нейтронов  $^3\text{He}$  поляризаторами (фильтрация).
- 5) метод поляризации нейтронов киральными магнетиками.
- 6) Метод поляризации магнитными линзами (магнитная оптика).



# Лекция 5

## Поведение спина нейтрона в магнитном поле: адиабатический, неадиабатический и резонансный случаи

Литература:

[1] С.В. Малеев, Лекция 1. <http://lns.pnpi.spb.ru/netschool/>

# Лекция 5

## Флипперы поляризации нейтронового пучка

Все флипперы поляризации нейтронового пучка «работают», основываясь на поведении спина нейтрона в магнитном поле.

- 1) Флиппер Мезея,
- 2) флиппер на основе экрана (фольги) с током,
- 3) флиппер Драбкина-Окорокова,
- 4) флиппер Корнеева,
- 5) радиочастотный резонансный флиппер
- 6) адиабатический радиочастотный флиппер.

# Лекция 6

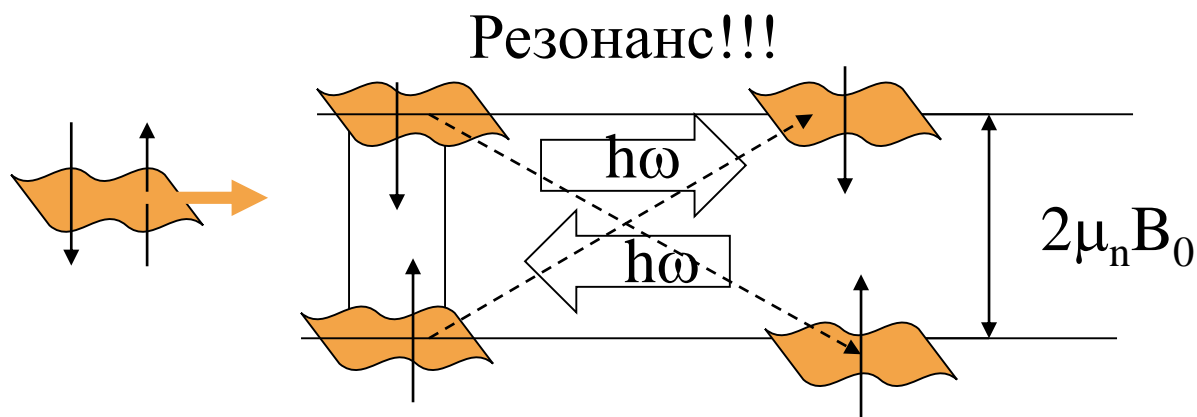
---

Радиочастотный резонансный  
флиппер спина нейтрона  
( адиабатический и простой)

Пространственный спиновый  
резонанс (Гармошка Драбкина)

# Лекция 7

## Нейтронная резонансная интерферометрия



«Прецессия» нейтрона в нулевом поле  
Множественное расщепление нейтронной волны в  
раздельно осциллирующих магнитных полях

# Лекция 8

---

Методики исследования  
вещества с поляризованными  
нейтронами



# Лекция 8

## Прямые методы

Мы говорим о дифракции, спектроскопии, МУРН и рефлектометрии поляризованных нейтронов.

Существует 3 подхода исследования магнитных систем этими методами.

А именно, рассеяние поляризованных нейтронов

- 1) **без анализа поляризации** сечения рассеяния,
- 2) **с анализом поляризации** сечения рассеяния,
- 3) **с трехмерным анализом поляризации** сечения рассеяния.

# Лекция 8

Непрямые методы

Использование поляризованных нейтронов для исследования *немагнитных* систем.

- А именно, использование поляризованных нейтронов
- 1) в нейтронной спин-эхо спектроскопии для измерения времени релаксации системы (квазиупругое рассеяние),
  - 2) в значительном улучшении разрешения трех-осных спектрометров нейтронов,
  - 3) в выделении полезного сигнала из некогерентного фона при рассеянии на биологических системах.

# Лекция 9

Рассеяние поляризованных нейтронов **без анализа поляризации** сечения рассеяния,

- 1) **Эффект магнитно ядерной интерференции** в сечения рассеяния,
- 2) **Киральное магнитное рассеяние.**

# Лекция 10

---

Методики исследования с  
поляризованными нейтронами с  
**анализом нейтронов после  
рассеяния**

# Лекция 11

Методики исследования с  
векторным (3-мерным) анализом  
поляризации нейтронов после  
рассеяния  
(сферическая нейтронная  
поляриметрия ?)

**Давайте, договоримся о терминах!**

# Лекция 12

---

Нейтронное Спиновое Эхо-интерференция спиновых состояний.

# **Лекция 13 – лекция 16**

---

**Школа по физике  
поляризованных нейтронов  
14 - 15 декабря 2017 года**

*СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ*