



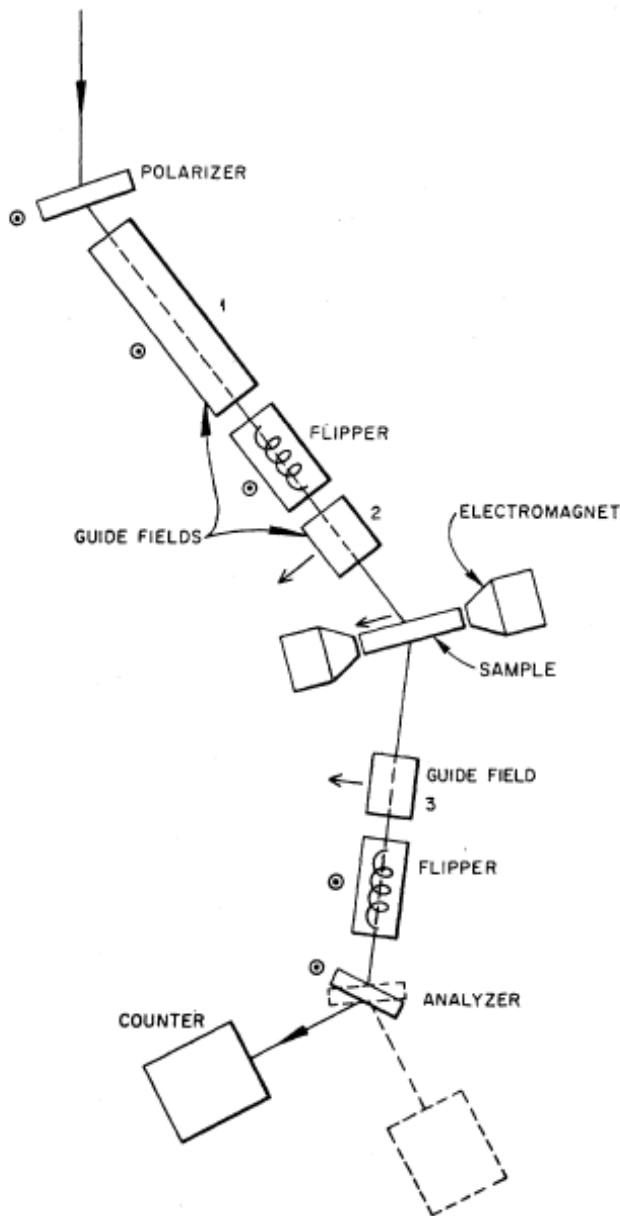
Санкт-Петербургский
государственный
университет
Физический факультет
Кафедра нейтронной и
синхротронной физики

Сыромятников Владислав Генрихович

Лекция №7. Нейтронный
поляризационный анализ.
Поляризаторы. Спин-флипперы.

Нейтронный поляризационный анализ

Moon, Riste and Koehler (ORNL, USA) (1969)



Используя такую (или подобную) схему с использованием поляризатора, анализатора и двух спин-флипперов (до и после образца) можно измерять сечения нейтронного рассеяния на образце, как с переворотом спина нейтрона (**+ - и - +**), так и без переворота спина (**++ и --**). Это позволяет изучать магнитные свойства образца.

$$P(\lambda) = P_p(\lambda) \cdot P_a(\lambda) = \frac{r(\lambda) - 1}{1 - r(\lambda) \cdot [1 - 2 \cdot f_1(\lambda)]}$$

Нейтронные поляризаторы. Типы поляризаторов.

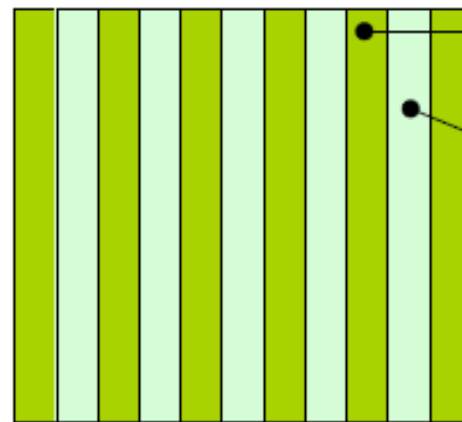
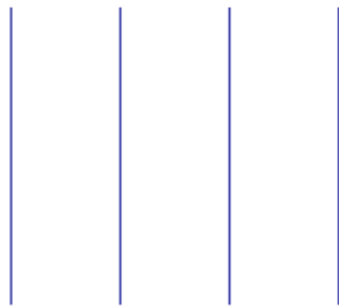
Типы поляризаторов: зеркальные, кристаллические и ^3He

1. Зеркальные – нейтронные поляризующие зеркала и суперзеркала и монохроматоры.
О них уже говорилось. Сегодня рассмотрим поляризаторы на прозрачных для нейтронов подложках.
2. Поляризующие кристаллы – монохроматоры: сплав Гейслера, CoFe и др.
Они уже немного устарели и при создании новых установок они, как правило, не планируются. [Самостоятельно разобрать.](#)
3. ^3He сейчас популярен. Требуется сложная и дорогая инфраструктура.
Усиленно внедряется в технику нейтронного эксперимента.
Есть несколько статей, в которых проводится сравнение ^3He с суперзеркалами. Но не очень объективно.

Polarizing multi-layer & supermirror

1D

Plane wave; k_0



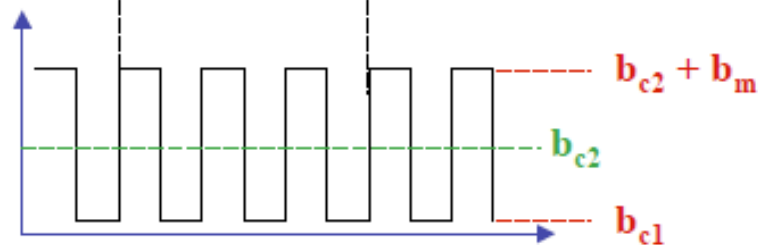
magnetic layers

$$b_2 = b_{c2} \pm b_m;$$

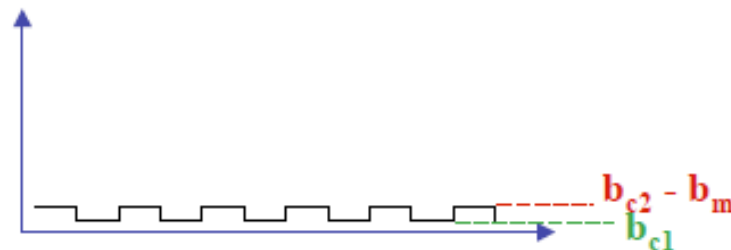
non-magn. layers:

$$b_1 = b_{c1}$$

For spin \uparrow : $b_{c2} + b_m$

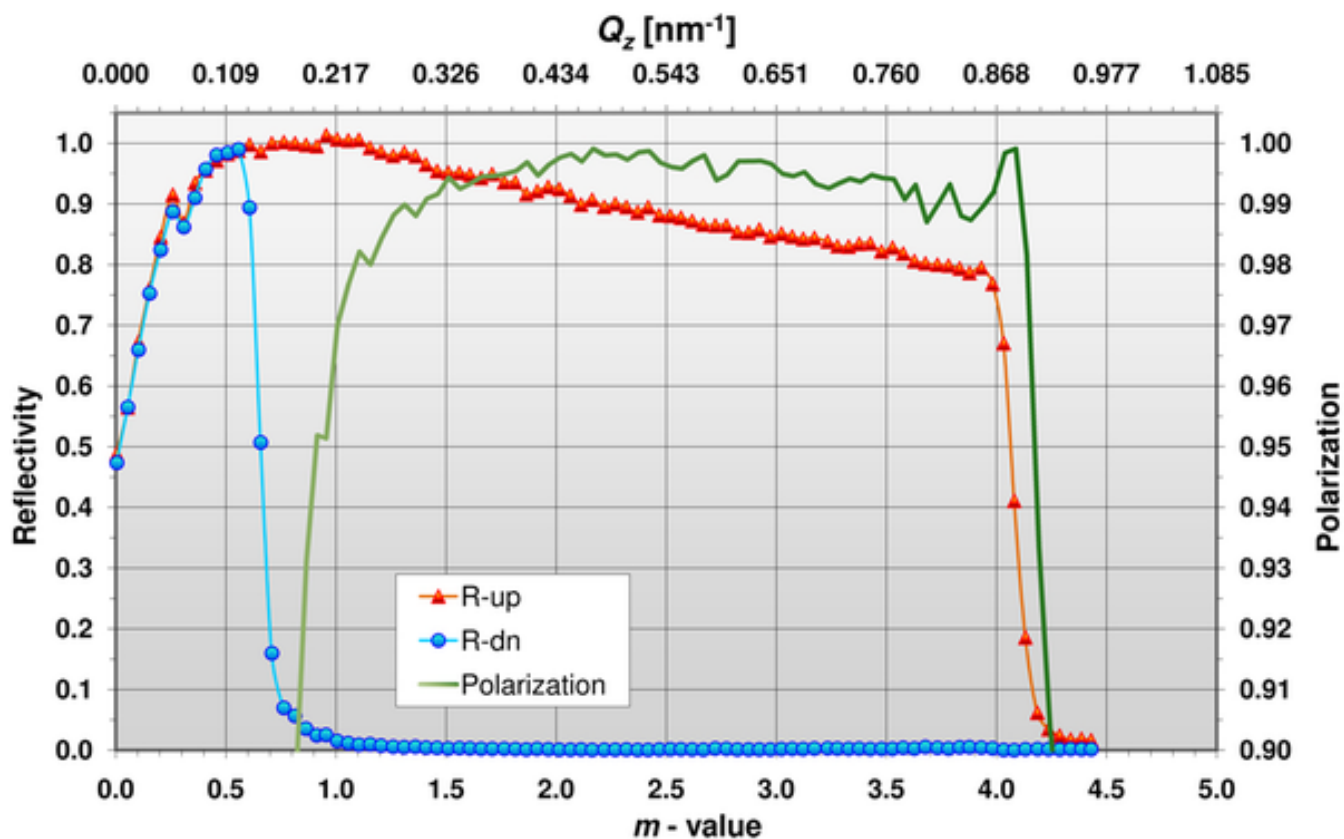
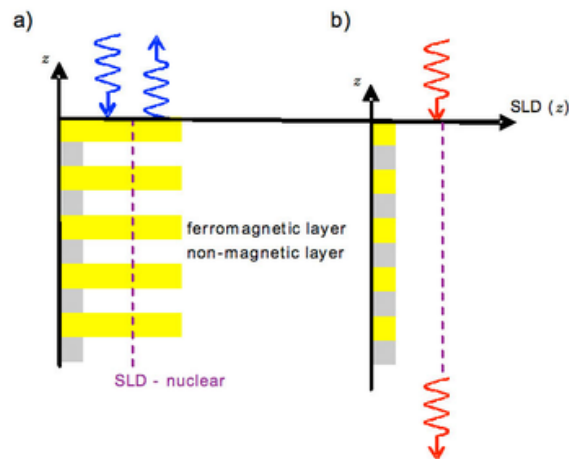


For spin \downarrow : $b_{c2} - b_m \approx 0$

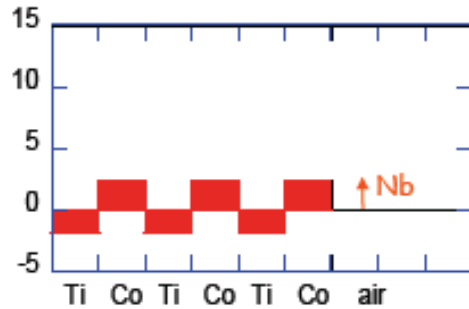


SwissNeutronics

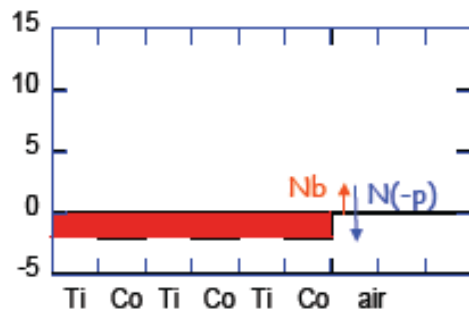
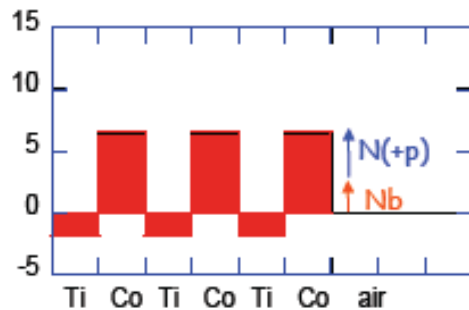
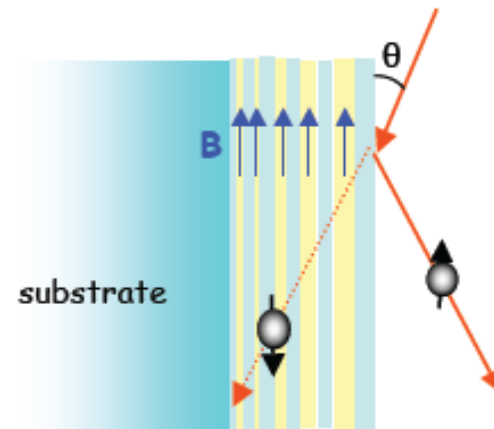
Fe/Si polarizing supermirror $m=4$



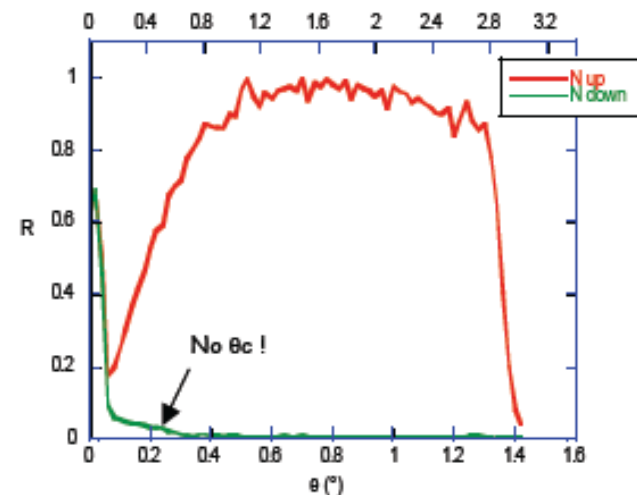
Co/Ti polarising supermirrors; K. Andersen, ILL



No magnetic field



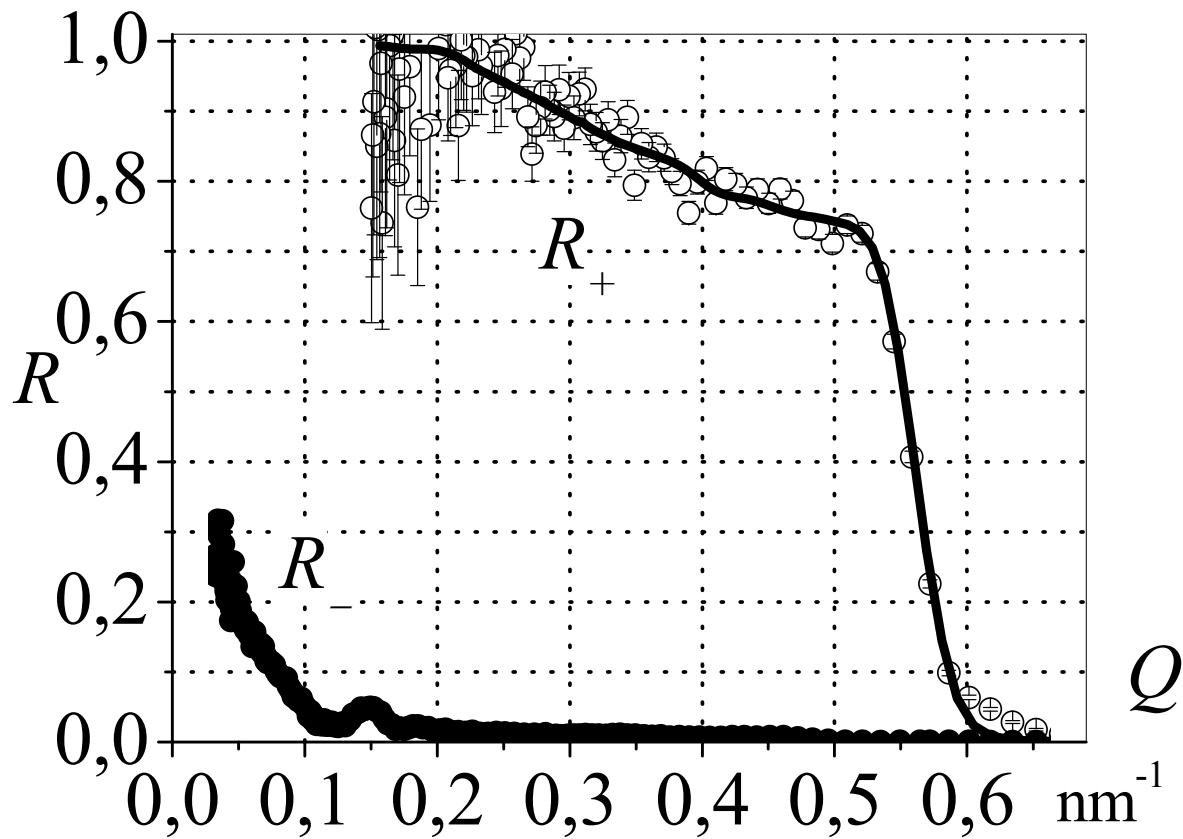
$$n^2 = 1 - \frac{\lambda^2 Nb}{2\pi} > 1$$



Поляризующее суперзеркало ПИЯФ

CoFe/TiZr $m=2.5$ (195 пар слоев)

на антиотражающем поглощающем TiZrGd подслое (270 нм).

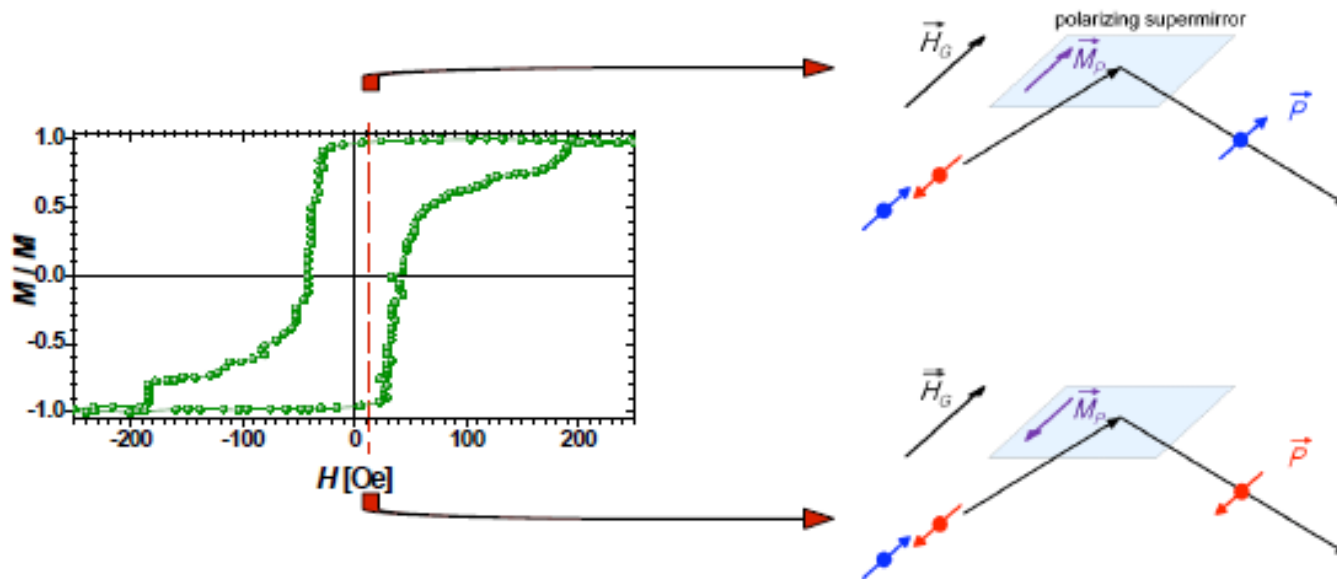


Реманентные полярирующие суперзеркала

'remanent' polarizing supermirrors - reversible neutron spin

magnetic anisotropy

high remanence



guide field to maintain neutron polarization ≈ 10 G

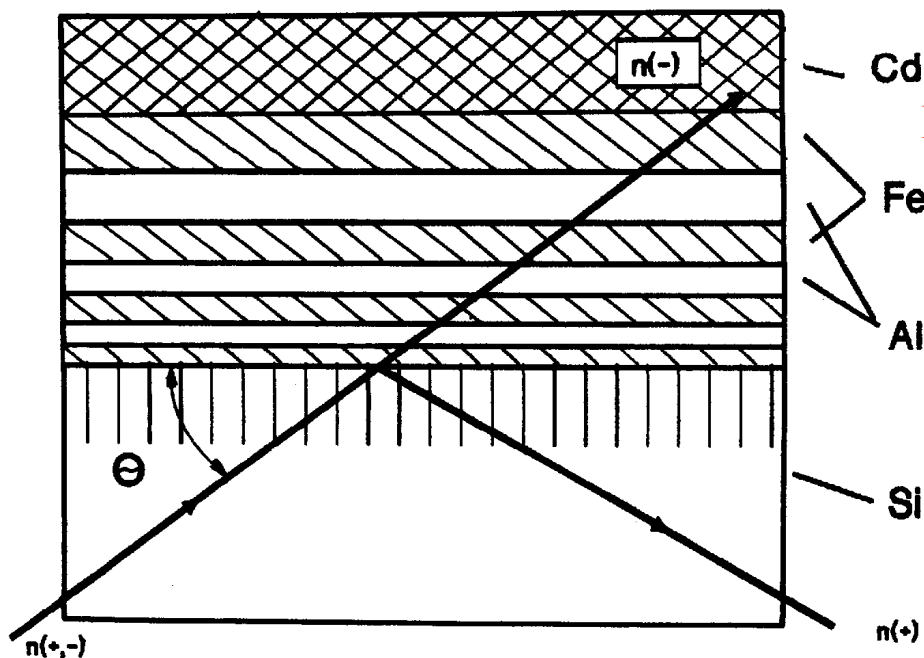
switching of polarizer/analyzer magnetization \Rightarrow short field pulse ≈ 300 G

Нейтронные поляризующие суперзеркала и монохроматоры на прозрачных для нейтронов подложках.

Для получения высокой поляризующей эффективности суперзеркала на прозрачной подложке:

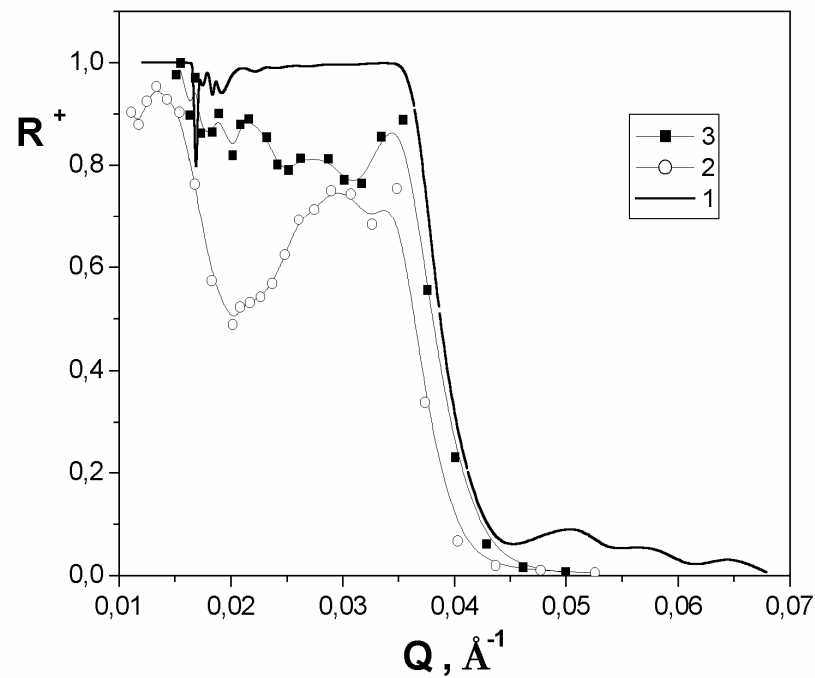
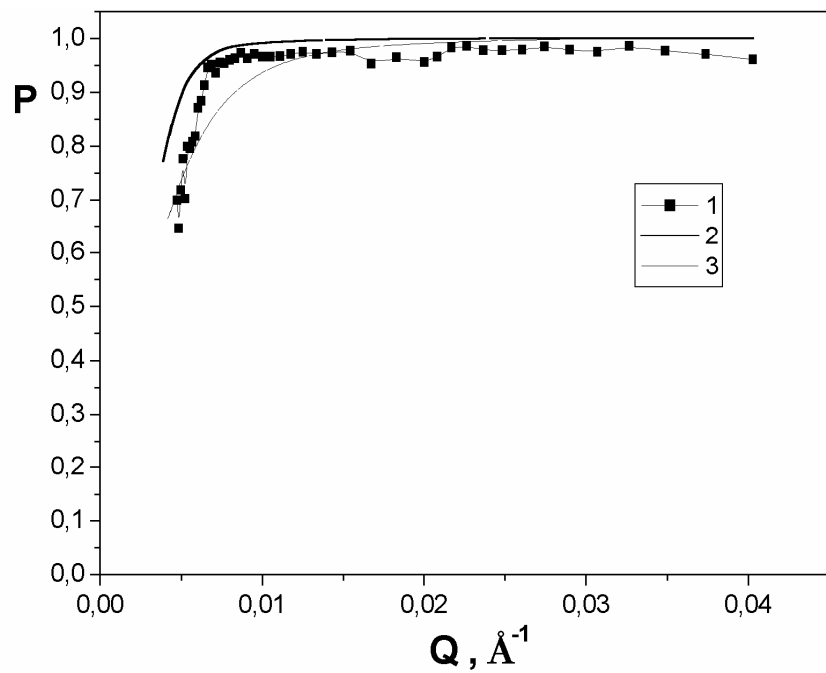
$$\lambda_{\text{грп}} \cong \lambda_{\text{гр}(1)}^{(-)} \cong \lambda_{\text{гр}(2)} \cong \lambda_{\text{гр(АОП)}}$$

Нейтронное поляризующее Fe/Al суперзеркало на кремниевой подложке с поглощающим слоем кадмия.



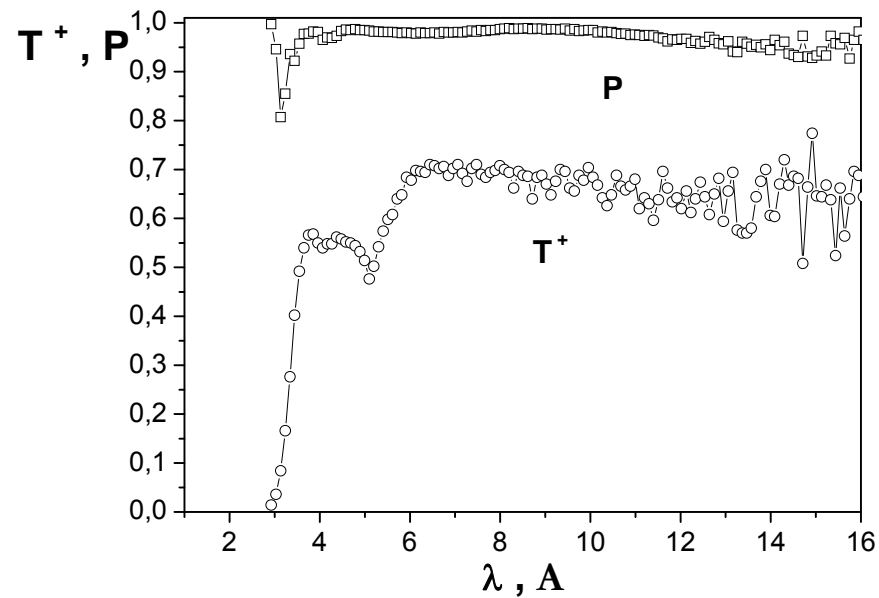
В.Г.Сыромятников и др. Патент РФ (1994).

Нейтронное поляризующее Fe/Al суперзеркало на кремниевой подложке с поглощающим слоем кадмия.



Нейтронное поляризующее Fe/Al суперзеркало на кремниевой подложке с поглощающим слоем кадмия.

Поляризатор для рефлектометра EROS (LLB, Saclay, France)



Нейтронное полярирующее Fe/Al суперзеркало на кремниевой подложке с поглощающим слоем кадмия.

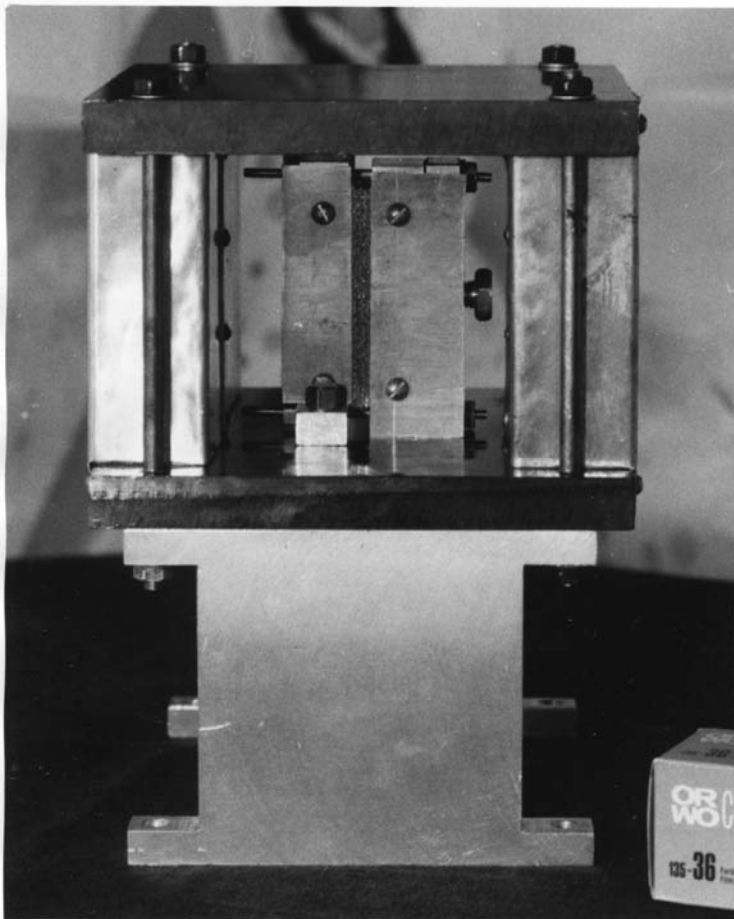


Рис. Общий вид поляризатора на базе сборки из плоских кремниевых пластин с суперзеркальным покрытием Fe/Al, установленного на установке **«Вектор»** (реактор ВВР-М, ПИЯФ) по изучению малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов.

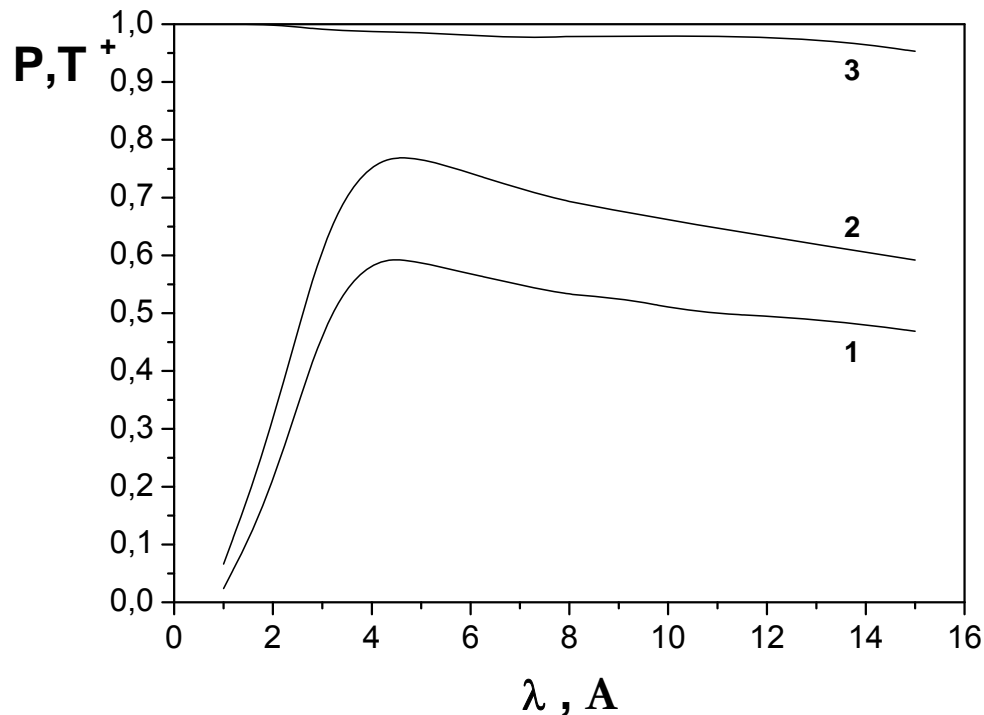
Нейтронное поляризующее Fe/Al суперзеркало на кремниевой подложке с поглощающим слоем кадмия.

Рис. Расчетные спектральные зависимости пропускания (+) спиновой компоненты пучка

для изогнутого по окружности **поляризующего многоканального нейтроновода (ПМНВ)** на основе двусторонне полированных кремниевых пластин толщиной 100 мкм, прижатых друг к другу без воздушных промежутков. ПМНВ установлен на выходе нейтроновода с покрытиями стенок из природного никеля.

Вогнутая и выпуклая стенки ПМНВ (поверхности кремниевых пластин) имеют суперзеркальное Fe/Al покрытие (70 слоев) (реальное (кривая 3, Рис.4.15) и идеальное) и из природного железа, соответственно.

Длина ПМНВ – 42 мм.

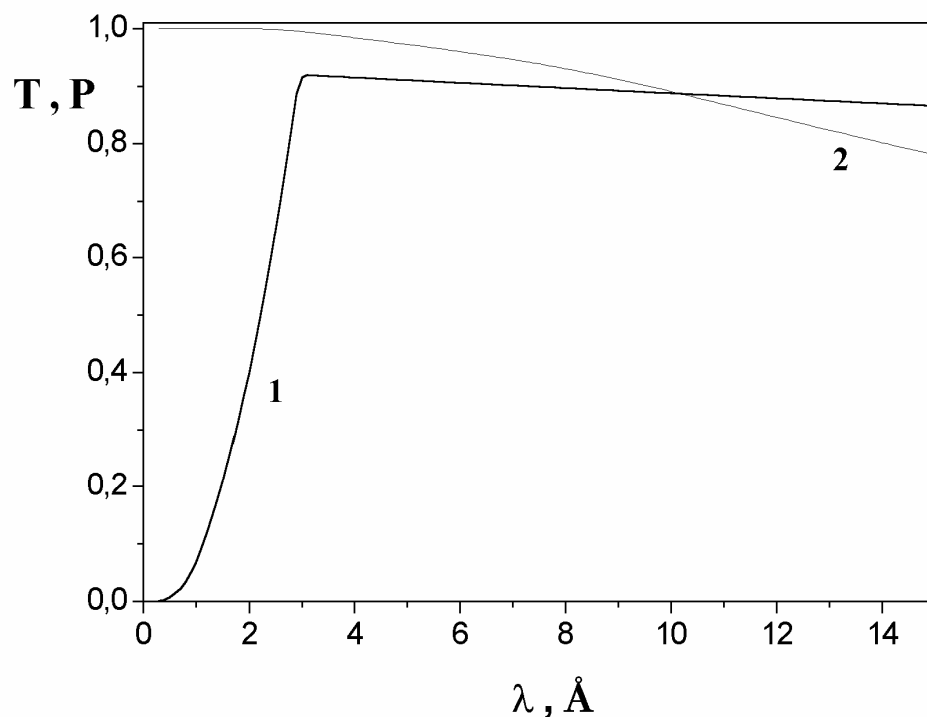
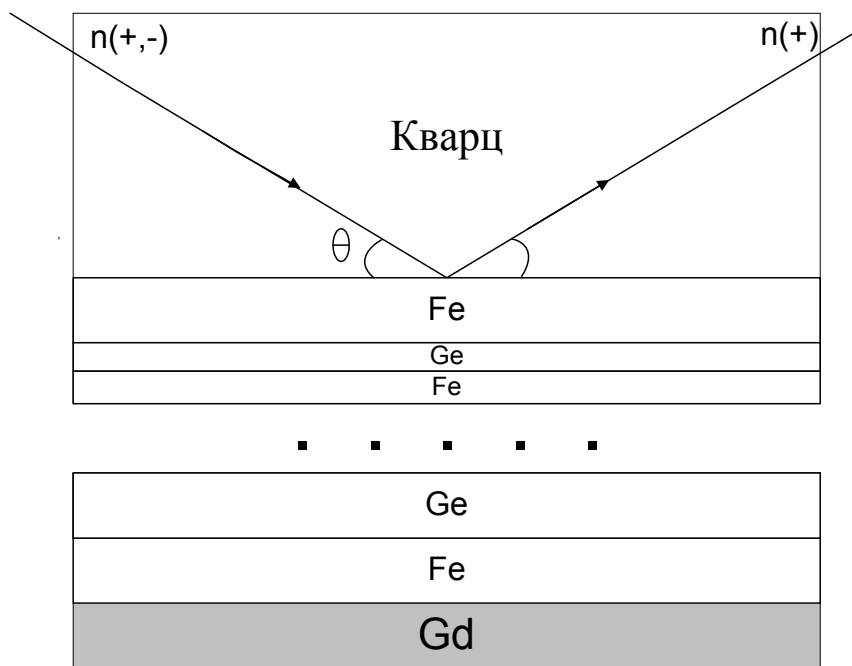


Поляризаторы на прозрачных для нейтронов и света подложках.

Поляризующий Fe/Ge суперзеркальный микробендер на кварце
с поглощающим Gd слоем

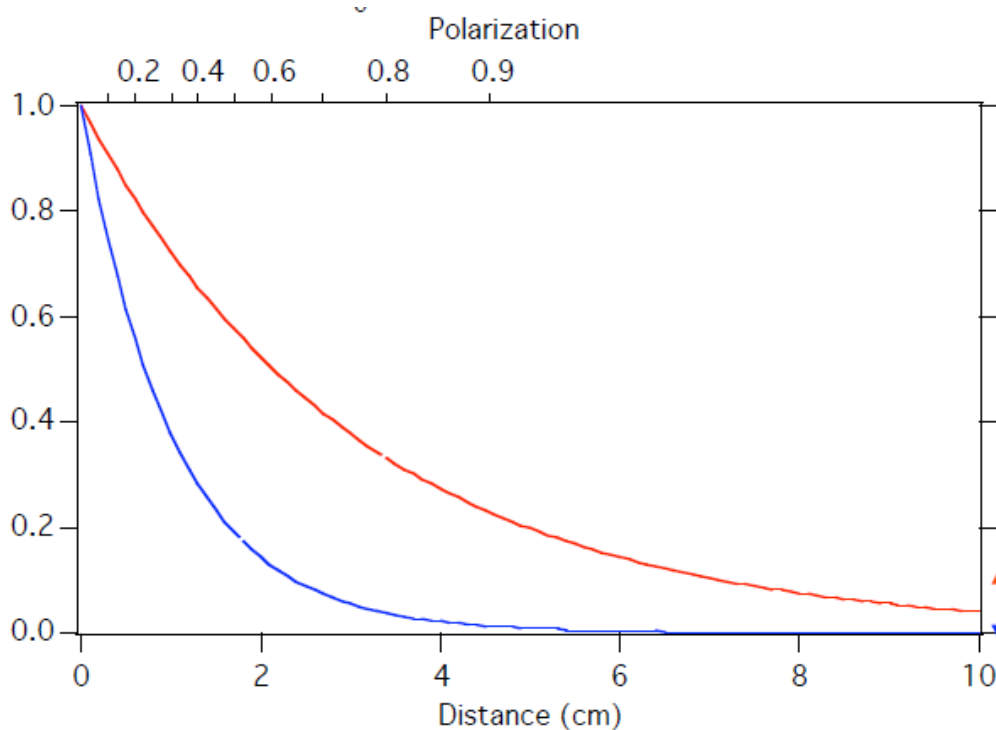
В.Г.Сыромятников, В.Л.Алексеев Патент РФ (1994).

Длина 11.6 мм $a = 50\mu\text{м}$ при $\lambda^* = 5 \text{ \AA}$



Поляризаторы нейтронов на ^3He .

Работа нейтронных спиновых фильтров на базе ^3He основана на сильной зависимости сечения поглощения от взаимной ориентации спинов ядер ^3He и нейтрона. Для достаточно толстого слоя ^3He все нейтроны с антипараллельной ориентацией спинов будут поглощены, в то время как почти все нейтроны с параллельной ориентацией пройдут слой этого газа. В результате на выходе будем иметь 100% поляризацию нейтронного пучка и почти 50% его пропускания.



$$He(n, p)^3H \quad \sigma_+ = \sigma \uparrow\uparrow \approx 0$$

$$\sigma_- = \sigma \downarrow\uparrow \approx 10666 \text{ барн для } 1.8 \text{ A}$$

$$T_n = T_0 \cdot \cosh(\sigma \cdot n \cdot l \cdot P_{He})$$

$$T_0 = T_E \cdot \exp(-\sigma \cdot n \cdot l)$$

$$P_n = \tanh(\sigma \cdot n \cdot l \cdot P_{He}) = \sqrt{1 - \left(\frac{T_0}{T_n}\right)^2}$$

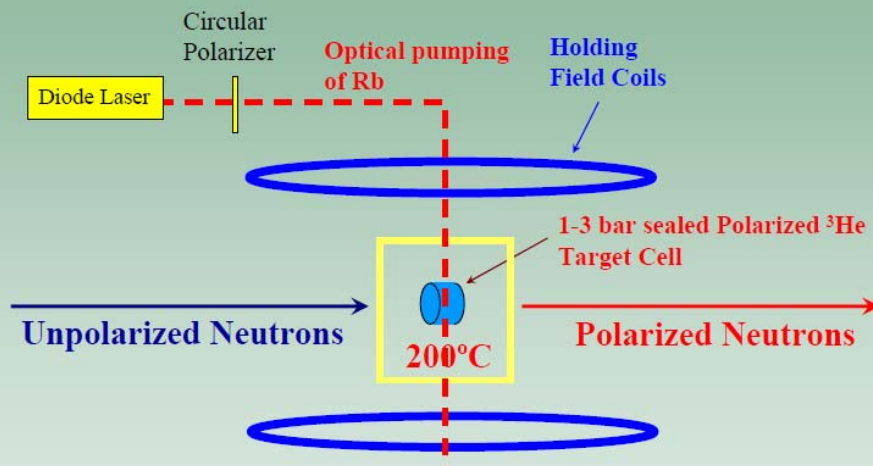
Поляризованный ^3He газ создается двумя методами оптической накачки:

SEOP – Spin Exchange Optical Pumping и **MEOP** – Metastable Exchange Optical Pumping

Метод спинового обмена удобен и хорошо сочетается с непрерывной работой на пучке, в то время как метод метастабильного обмена имеет более высокую поляризацию.

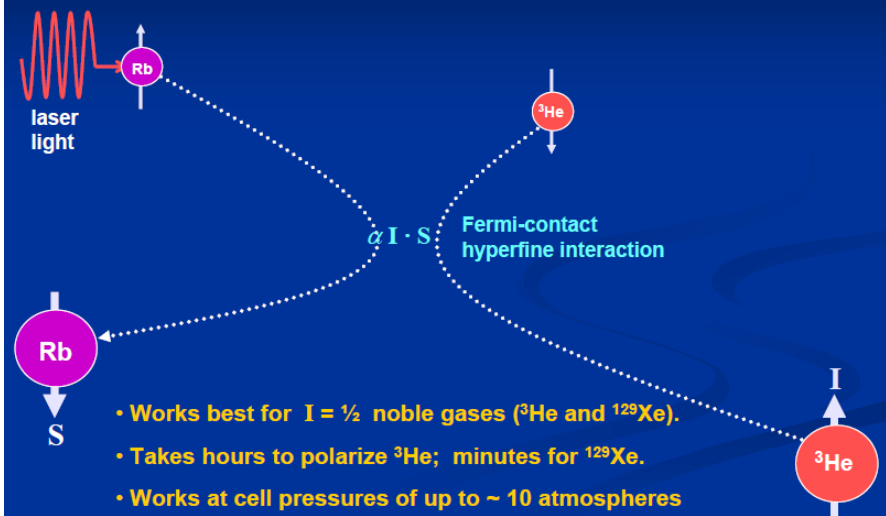
В настоящее время более удобно поляризовать газ вне пучка и затем перенести его на пучок. Сохранение поляризации в отсутствие оптической накачки требует однородного магнитного поля и специально приготовленной стеклянной ячейки с медленной релаксацией стенок. Изготавливаются ячейки с временем релаксации порядка 1 месяца,

В будущем постоянно работающие спиновые фильтры могут быть установлены прямо на нейтронную установку.

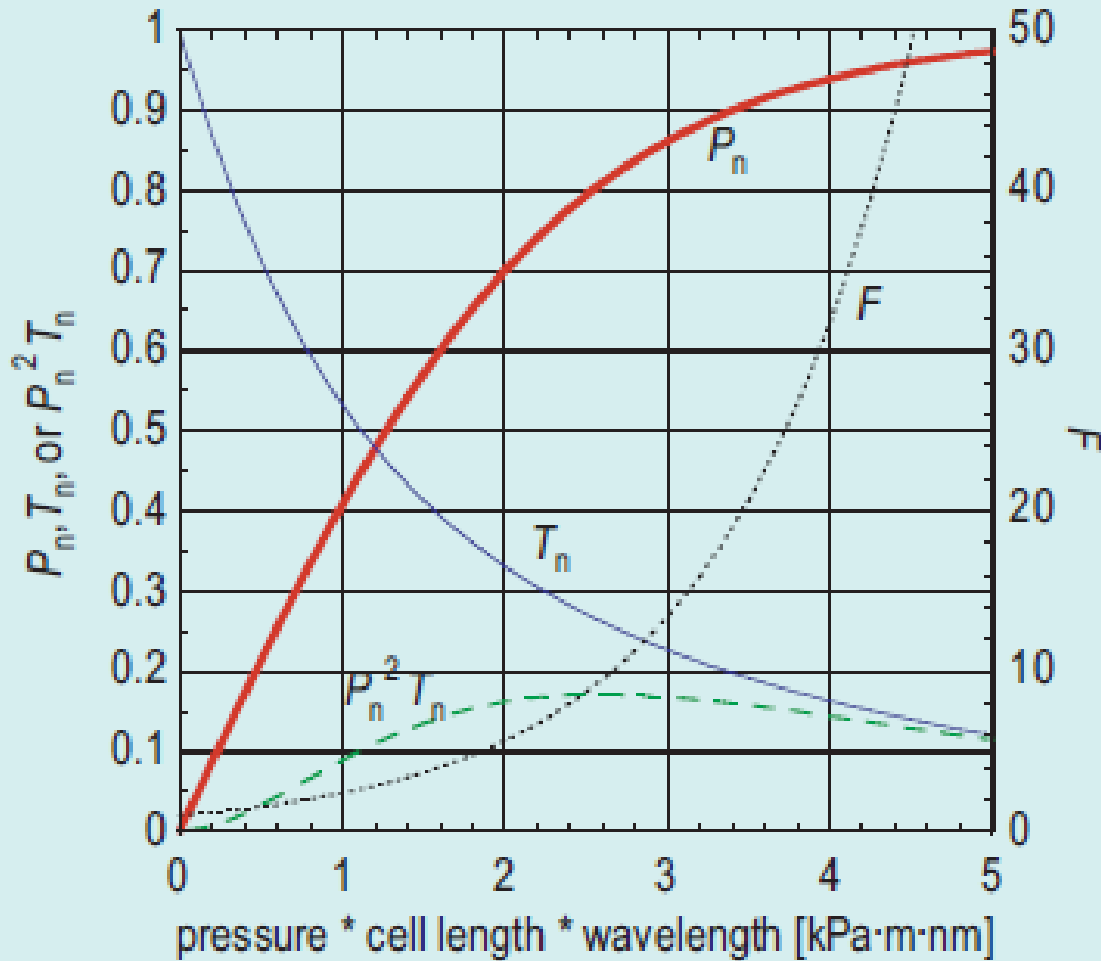


Rb atom transfers its polarization to ^3He by collision. Then ^3He nuclei is polarized by hyperfine interaction.

Spin-Exchange Collisions



NIST (USA)



$$P_{He} = 60\%$$

$$\lambda = 0.5 \text{ nm}$$

$$7 \text{ kPa} \cdot \text{m}$$

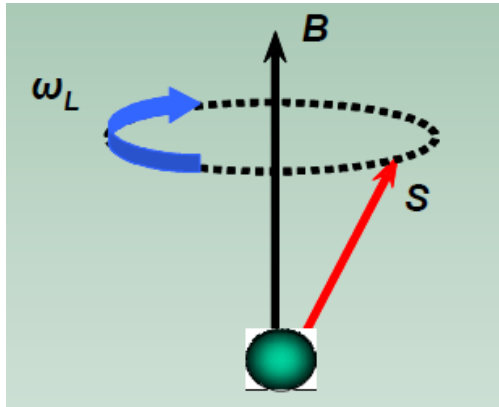
$$P_n = 90\%$$

$$T_n = 20\%$$

Нейтронные спин-флипперы

1. Адиабатические спин-флипперы

Спин-флиппер Мезея для монохроматического пучка

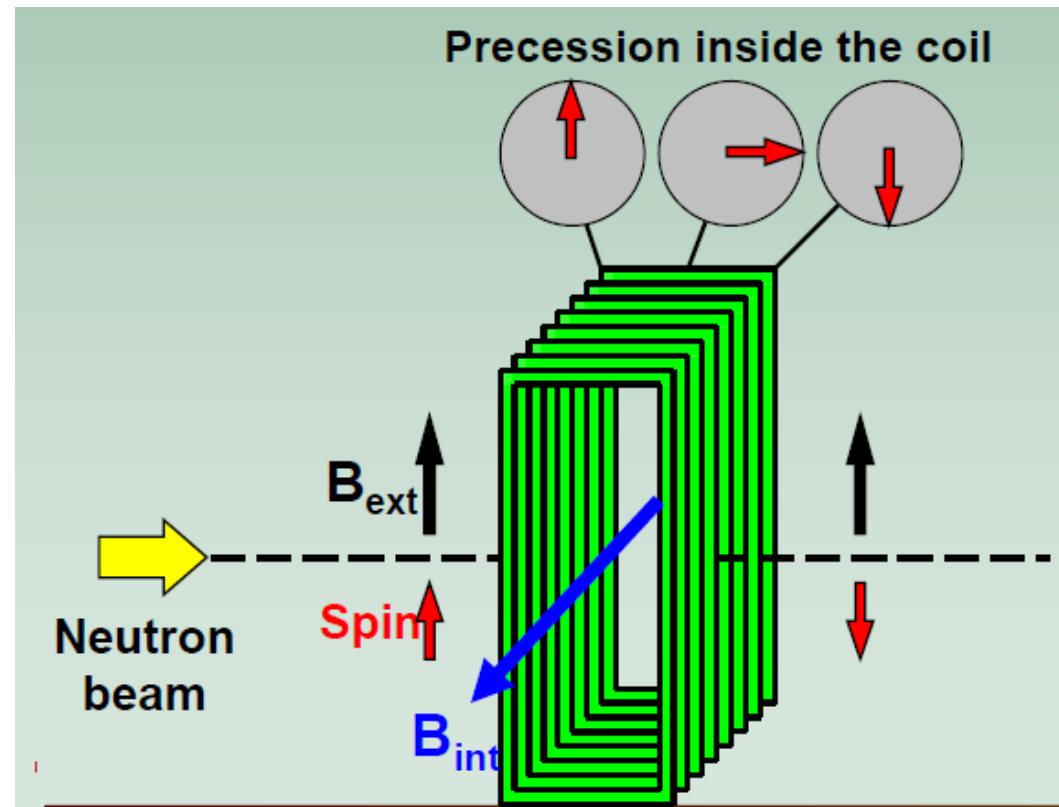


Ларморова прецессия

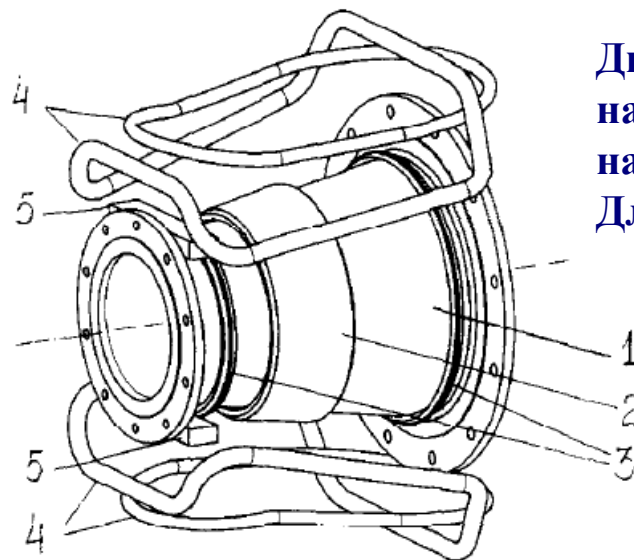
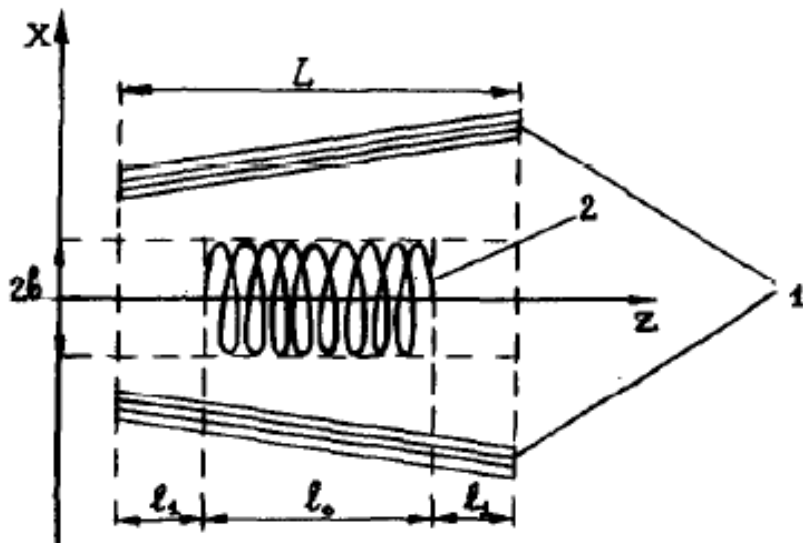
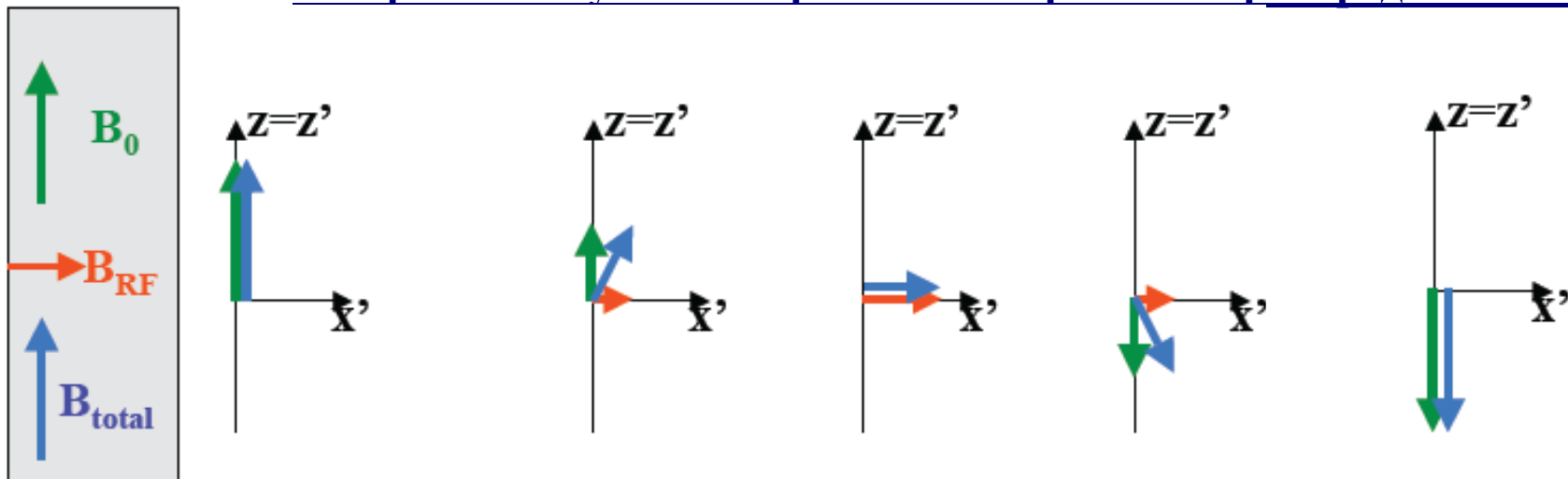
$$\omega_L = \gamma \cdot B$$

$$N = \frac{1}{135.65} \cdot B(\text{Gauss}) \cdot d(\text{cm}) \cdot \lambda(\text{A})$$

- число оборотов спина
нейтрона вокруг вектора B .



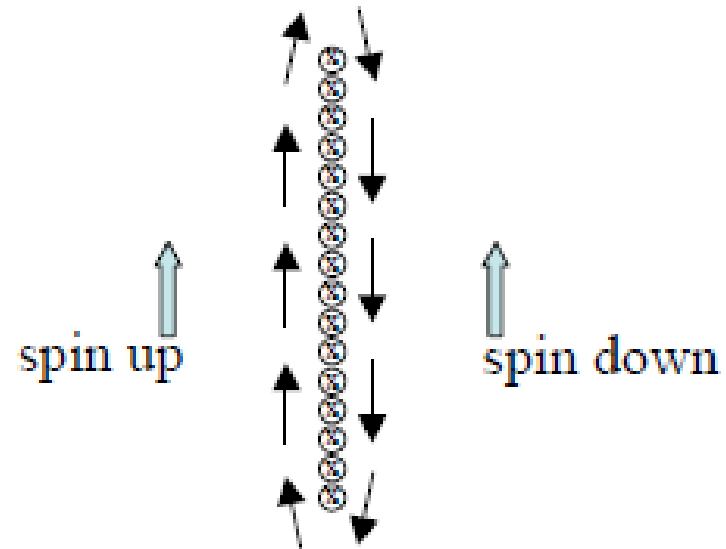
Адиабатический радиочастотный спин-флиппер для нейтронного пучка с широким спектральным распределением.



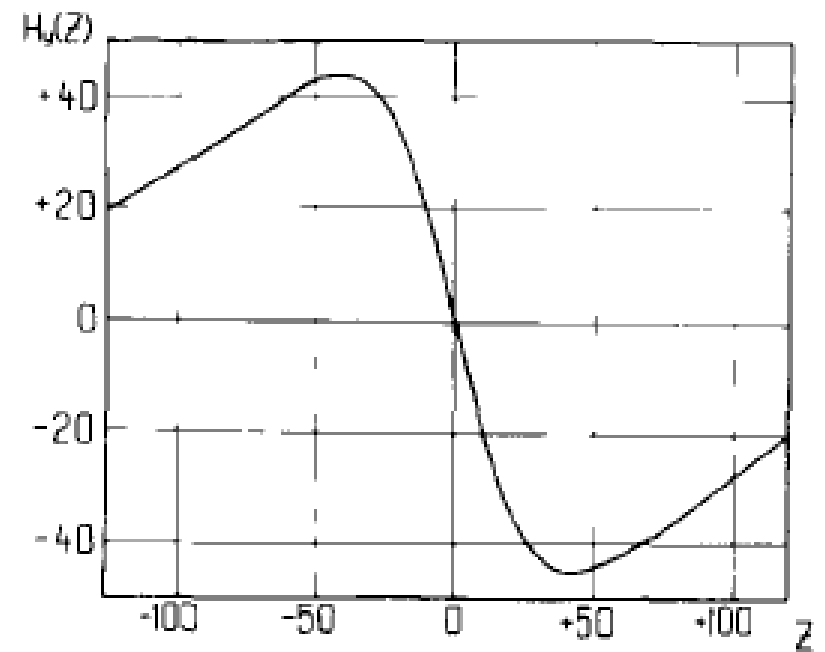
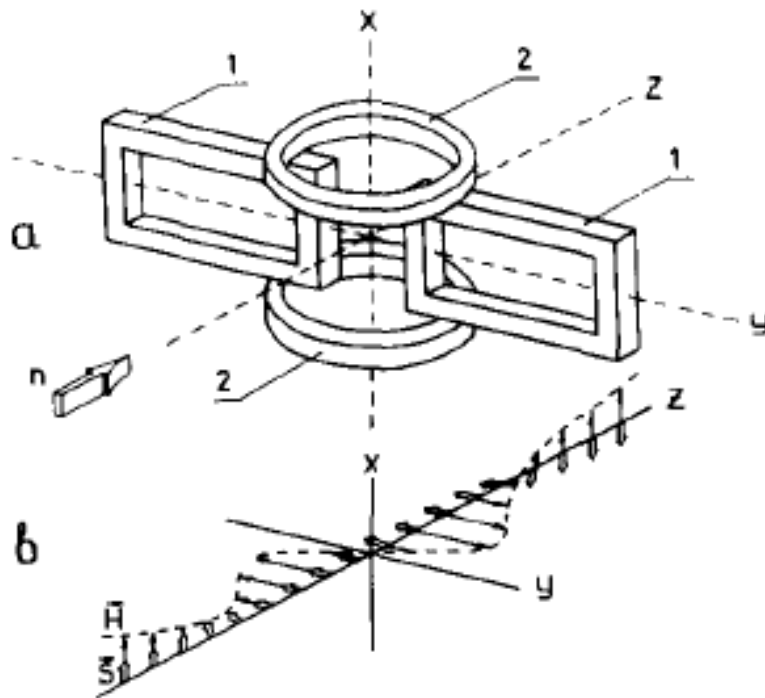
Диаметр:
на входе 200мм,
на выходе 350 мм.
Длина 450 мм.

2. Неадиабатические спин-флипперы

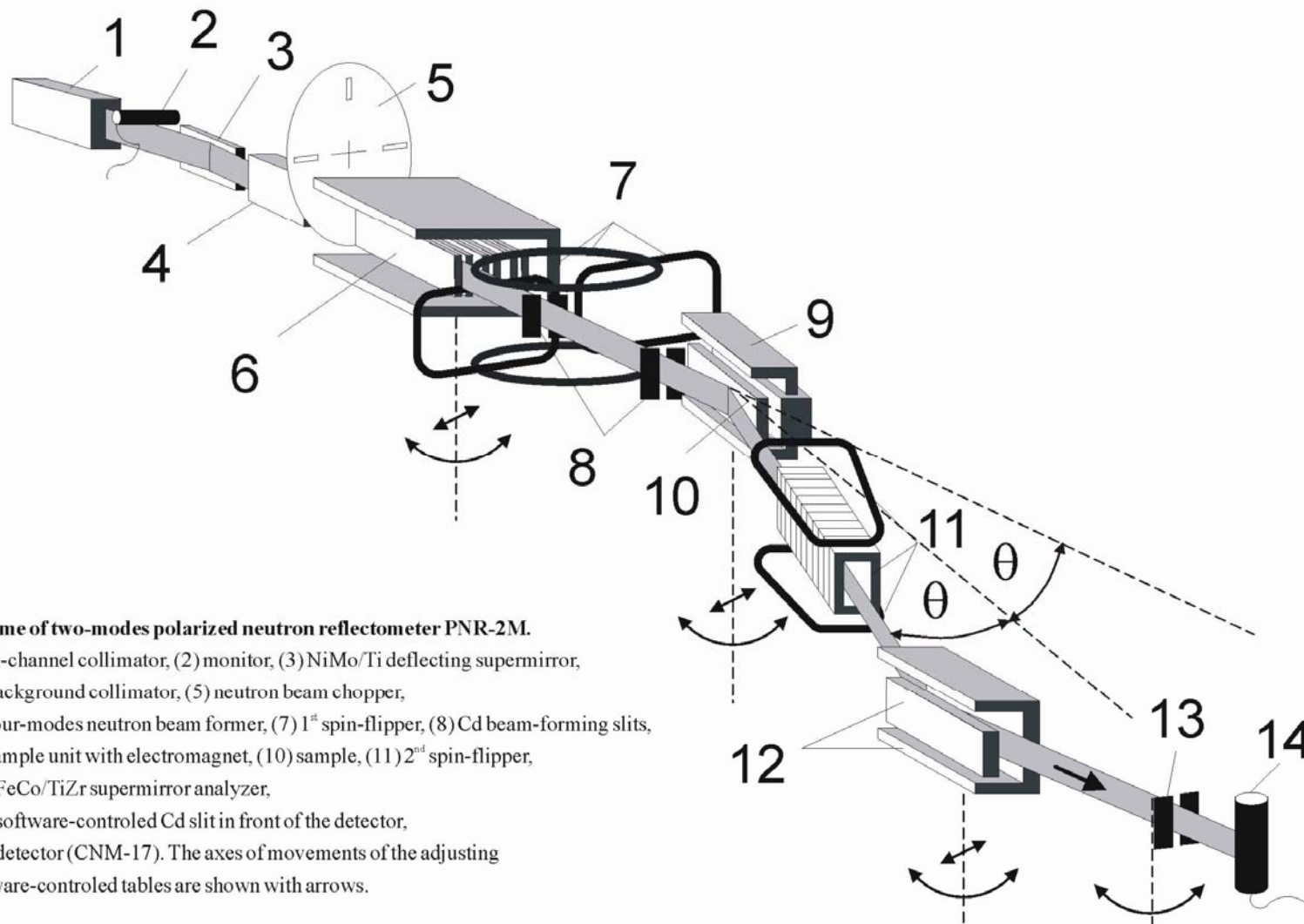
Спин-флиппер в виде фольги с током.



Спин-флиппер Корнеева



Нейтронный рефлектометр НР-4М



Scheme of two-modes polarized neutron reflectometer PNR-2M.

- (1) in-channel collimator, (2) monitor, (3) NiMo/Ti deflecting supermirror,
- (4) background collimator, (5) neutron beam chopper,
- (6) four-modes neutron beam former, (7) 1st spin-flipper, (8) Cd beam-forming slits,
- (9) sample unit with electromagnet, (10) sample, (11) 2nd spin-flipper,
- (12) FeCo/TiZr supermirror analyzer,
- (13) software-controlled Cd slit in front of the detector,
- (14) detector (CNM-17). The axes of movements of the adjusting software-controlled tables are shown with arrows.

$$f_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_{--} - I_{-+}}{I_{++} - I_{+-}} \right)$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_{--} - I_{+-}}{I_{++} - I_{-+}} \right)$$

