



***ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
НИЦ КИ (ГАТЧИНА, РОССИЯ)***

**Школа по физике поляризованных нейтронов
17-18 декабря 2015, НИЦ КИ ПИЯФ, Гатчина, Россия**

Н.К. Плешанов

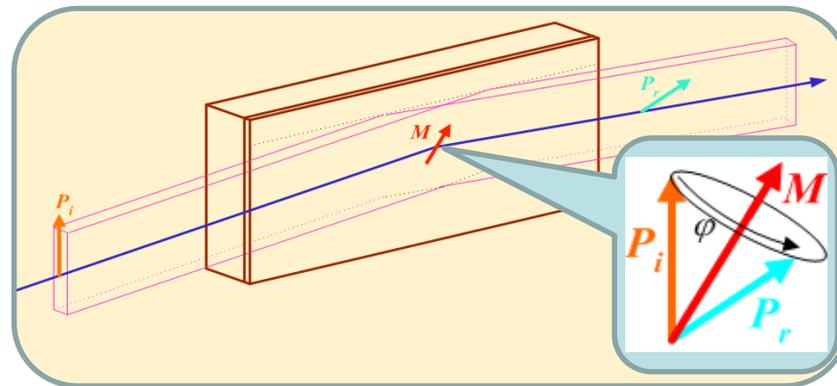
***Первый нейтронный отражатель - флиппер :
эксперимент, некоторые перспективы***

Нейтронный отражатель - вращатель спина

“Neutron spin turners including flippers can be made with mirrors on the basis of magnetically anisotropic thin films” [N.K. Pleshanov: Neutrons at the boundary of magnetic media - Z.Phys. B 94 (1994) 233]

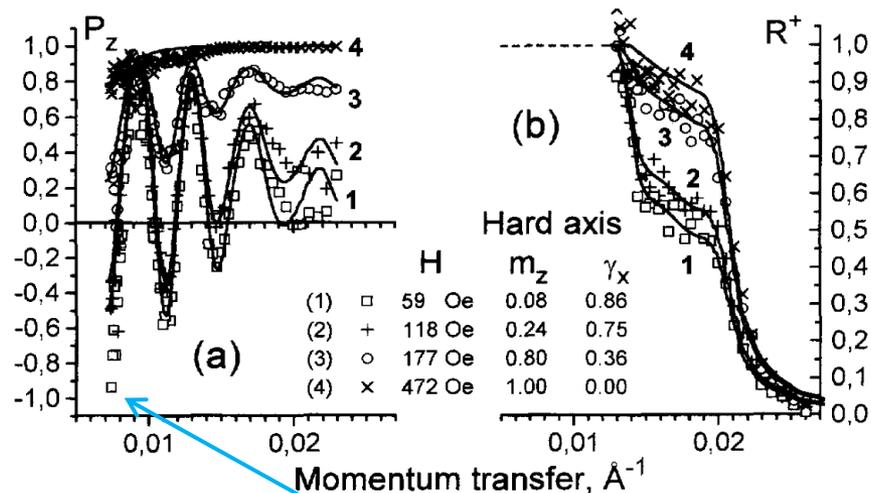
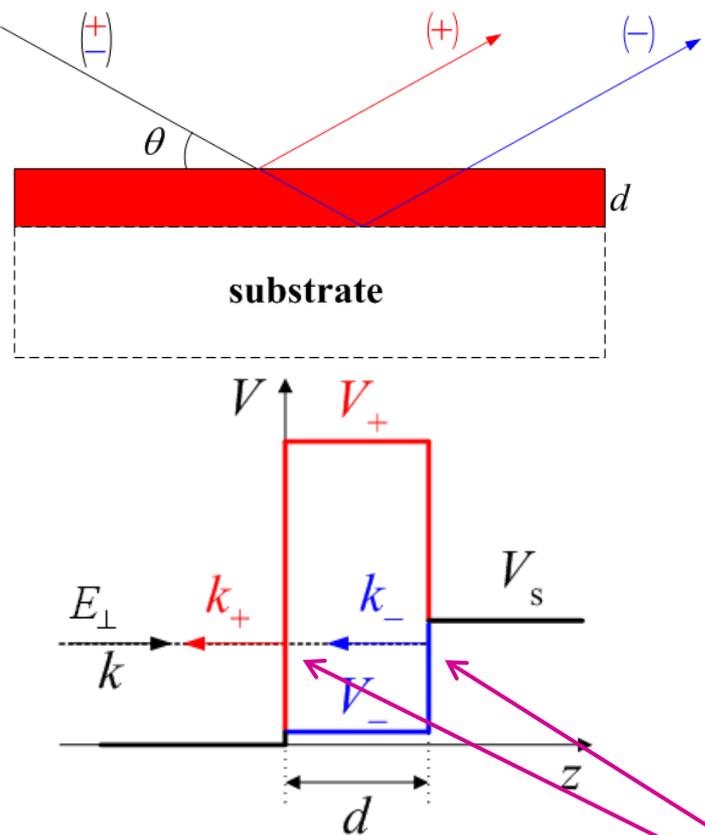
Для практического использования нужно, чтобы

- отражение было близко к 1,
- поворот спина при отражении слабо зависел от угла скольжения.



Эксперименты с пленкой CoFe на стеклянной подложке

[V.M. Pusenkov, N.K. Pleshanov, V.G. Syromyatnikov, V.A. Ul'yanov, A.F. Schebetov, J. Magn. Magn. Mat., 175 (1997) 237-248]



Наблюдение **флиппирования поляризации** при полном отражении со спиновым расщеплением на пленке CoFe (170 нм) с $M \perp P_0$

Нейтронная Спин-Манипуляционная Оптика

Представлено новое направление нейтронной оптики – спин-манипуляционная оптика, основанная на квантовых аспектах взаимодействия нейтрона с магнитно анизотропными слоями и означающая переход от 1D (селекция спинов) к 3D (вращение спинов) в поляризационной нейтронной оптике.

Предложены решения, которые обеспечивают одновременно высокое отражение ($R \sim 1$) и слабую зависимость угла поворота спина от длины волны нейтрона и от угла скольжения. Открываются **новые возможности для манипуляций со спинами**. Нейтронные отражатели-вращатели спина (в частности, $\pi/2$ - и π -вращатели) могут как использоваться непосредственно, так и комбинироваться для создания **компактных 3D-поляризаторов, 3D-анализаторов, 3D-ротаторов (спиновых манипуляторов), гиперполяризаторов, квантовых прецессоров и антипрецессоров спина.**

Предложенные гиперполяризаторы – новый тип поляризующих устройств, не только разделяют нейтроны с противоположными спинами, но и флиппируют «неправильные» спины, т.о. поляризуя до 100% нейтронов (с увеличением углового расхождения или ширины пучка – в соответствии с т. Лиувилля).

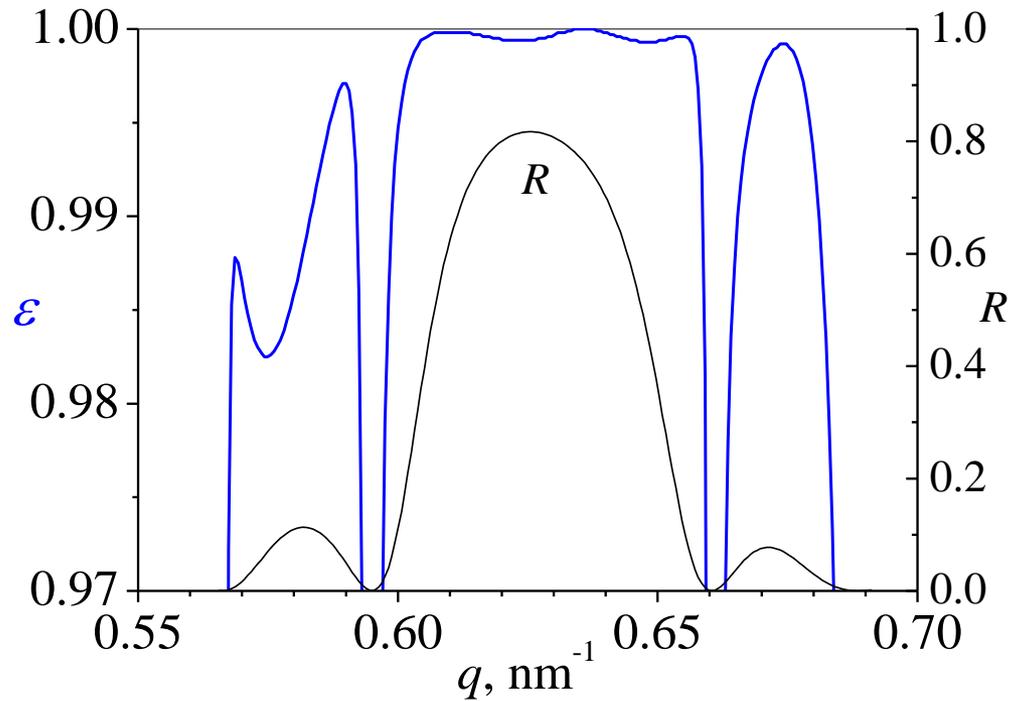
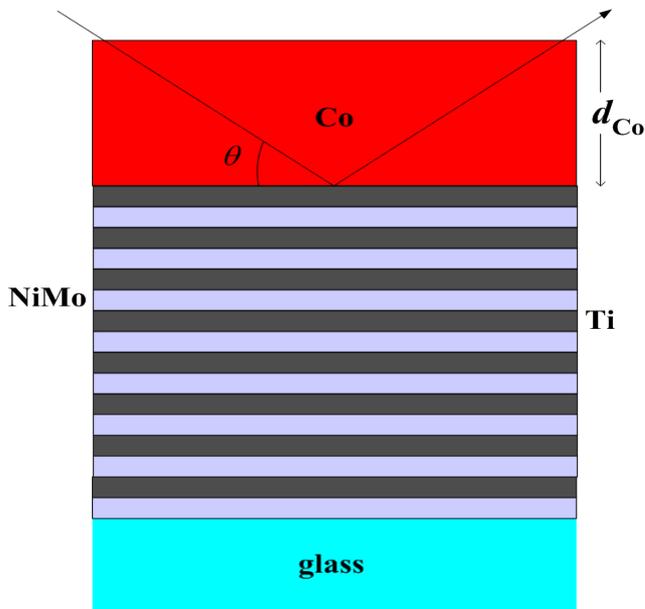
N.K. Pleshanov, J. Phys.: Conf. Ser. 528 (2014) 012023. – Neutron spin manipulation optics: basic principles and possible applications.

Н.К. Плешанов, Поверхность 1 (2015) 28-39. – Нейтронные отражатели-вращатели спина.

Ларморовское прецессионное покрытие (ЛПП) – магнитное покрытие, которое (почти) не отражает нейтроны. При прохождении нейтронов обеспечивает классическую ларморовскую прецессию

На больших q любое однослойное магнитное покрытие будет ларморовским.

Первый нейтронный отражатель-флиппер

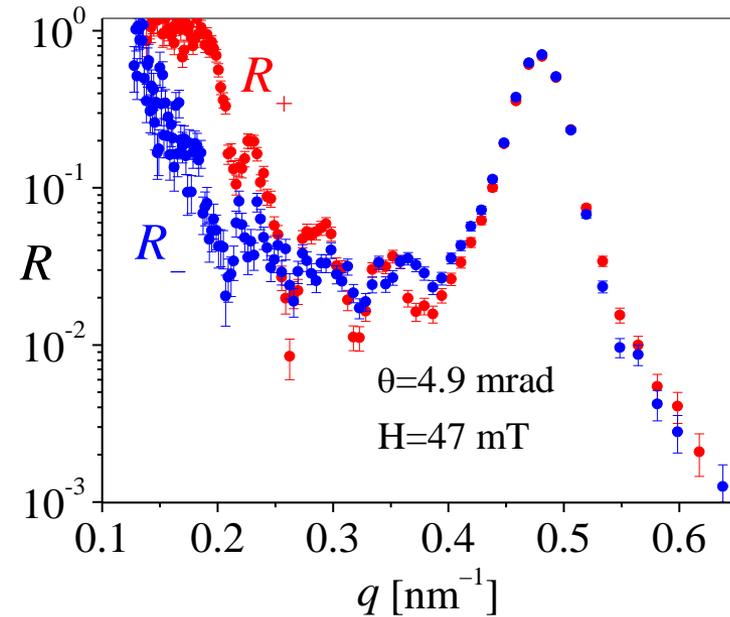
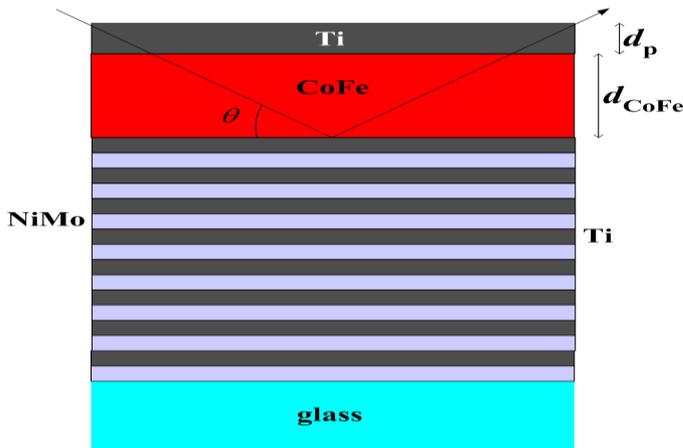


Расчетная эффективность $\varepsilon(q)$ и коэффициент отражения $R(q)$ флиппера на основе немагнитной периодической много-слойки $[\text{NiMo}(5.32\text{nm})/\text{Ti}(4.94\text{nm})] \times 20$, покрытой пленкой Co 92 нм

Расчеты

- Большие рабочие углы скольжения и высокие эффективности можно получить для вращателей спина монохроматических нейтронов в виде ларморовского прецессионного покрытия (ЛПП) на немагнитной многослойке ($R_+ \cong R_-$).
- Эффективность вращателя спина растет с ростом брэгговского угла.
- Вращение нейтронных спинов можно сочетать с монохроматизацией пучка.

Первый нейтронный отражатель-флиппер

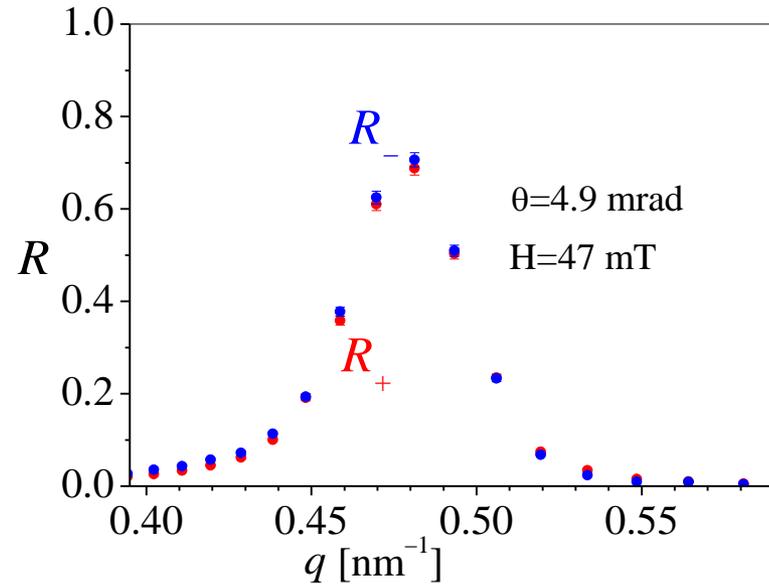
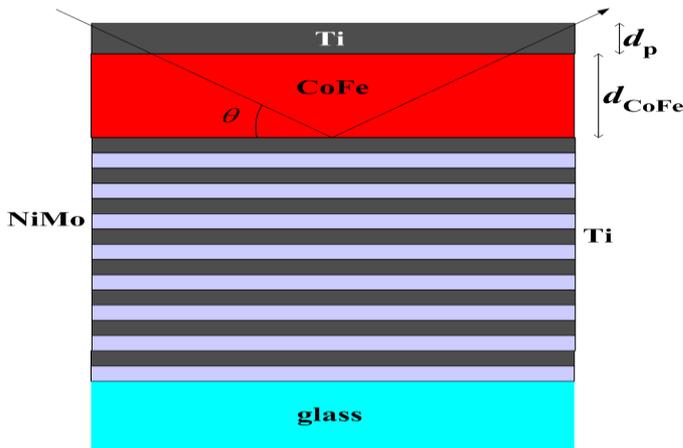


{NiMo(6.9nm)/Ti(6.1nm)}x20 - немагнитная периодическая многослойка, покрытая магнитно анизотропной пленкой CoFe толщиной 71.5 нм и защитным слоем Ti (30 нм) для предотвращения окисления.

Коэффициенты отражения $R_{\pm}(q)$ для нейтронов со спином вверх (+) и вниз (-) от немагнитной периодической многослойки {NiMo(6.9nm)/Ti(6.1nm)}x20, покрытой пленкой CoFe(71.5 нм) (ЛПП) и защитным слоем Ti (3 нм). Внешнее поле 47 мТ. $R_{+} \cong R_{-}$ для брэгговского пика.

Немагнитная периодическая структура обеспечивает выполнение условия $R_{+} \cong R_{-}$ для брэгговского пика – необходимое условие вращения спина вокруг намагниченности верхней пленки CoFe. Для флиппирования поляризации при отражении пучка остается повернуть образец так, чтобы намагниченность пленки была перпендикулярна слабому ведущему полю (спинам падающих нейтронов). Толщина пленки CoFe такова, что спин вращается на угол π .

Первый нейтронный отражатель-флиппер



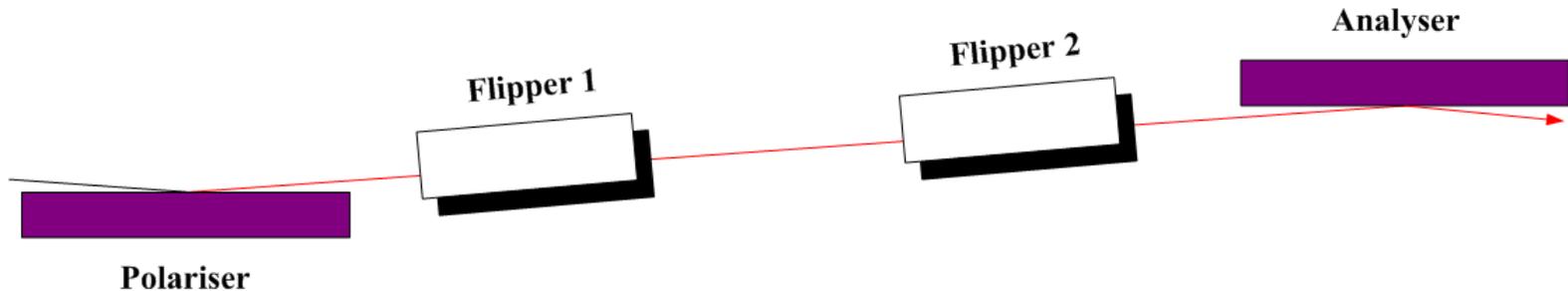
{NiMo(6.9nm)/Ti(6.1nm)}x20 - немагнитная периодическая многослойка, покрытая магнитно анизотропной пленкой CoFe толщиной 71.5 нм и защитным слоем Ti (30 нм) для предотвращения окисления.

Немагнитная периодическая структура обеспечивает выполнение условия $R_+ \cong R_-$ для брэгговского пика – необходимое условие вращения спина вокруг намагниченности верхней пленки CoFe. Для флиппирования поляризации при отражении пучка остается повернуть образец так, чтобы намагниченность пленки была перпендикулярна слабому ведущему полю (спинам падающих нейтронов). Толщина пленки CoFe такова, что спин вращается на угол π .

Коэффициенты отражения $R_{\pm}(q)$ для нейтронов со спином вверх (+) и вниз (-) от немагнитной периодической многослойки {NiMo(6.9nm)/Ti(6.1nm)}x20, покрытой пленкой CoFe(71.5 нм) (ЛПП) и защитным слоем Ti (3 нм). Внешнее поле 47 мТ. $R_+ \cong R_-$ для брэгговского пика.

Первый нейтронный отражатель-флиппер

Стандартный метод определения эффективности флипперов



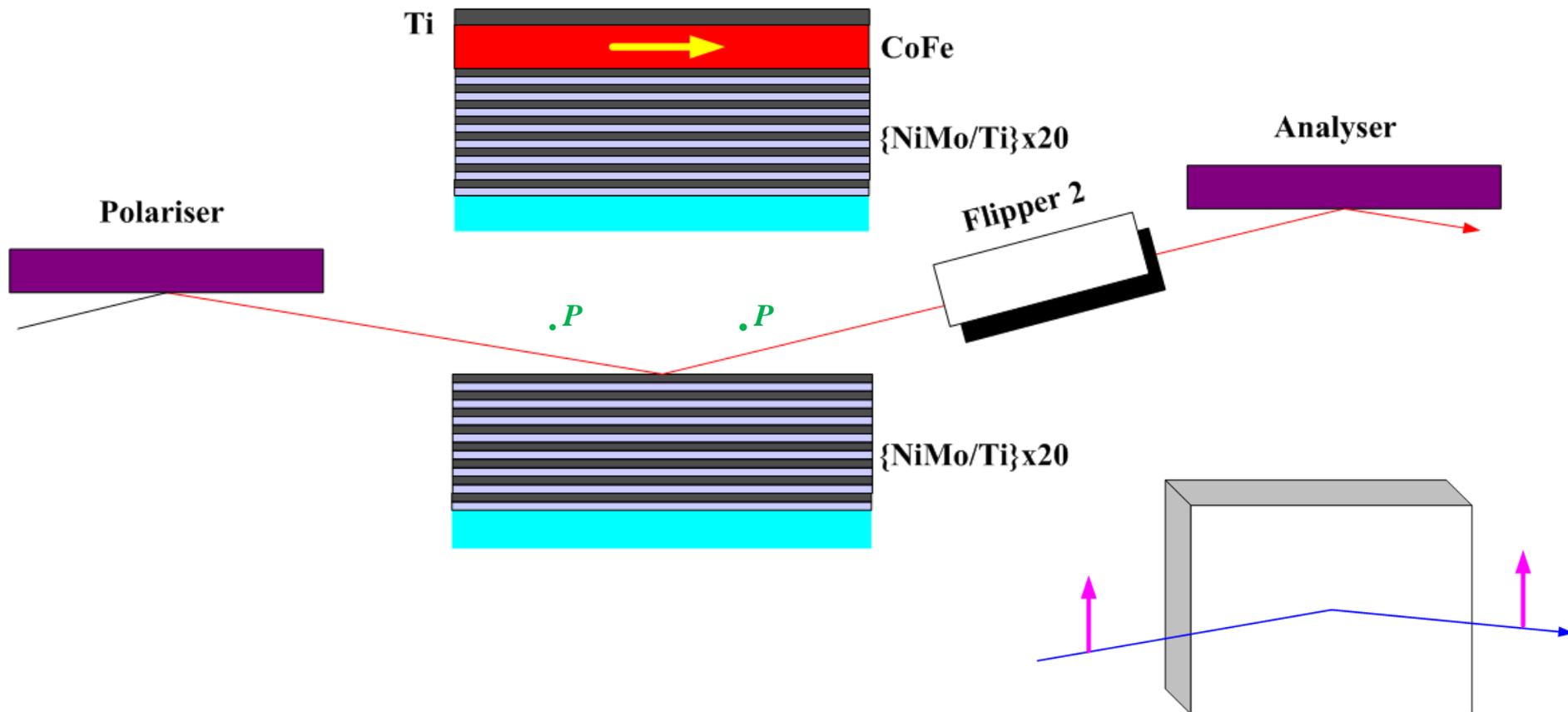
$$f_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_{\text{on,on}} - I_{\text{on,off}}}{I_{\text{off,off}} - I_{\text{off,on}}} \right)$$

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

Между поляризатором и анализатором пропускание $T_+ = T_- = 1$

Первый нейтронный отражатель-флиппер

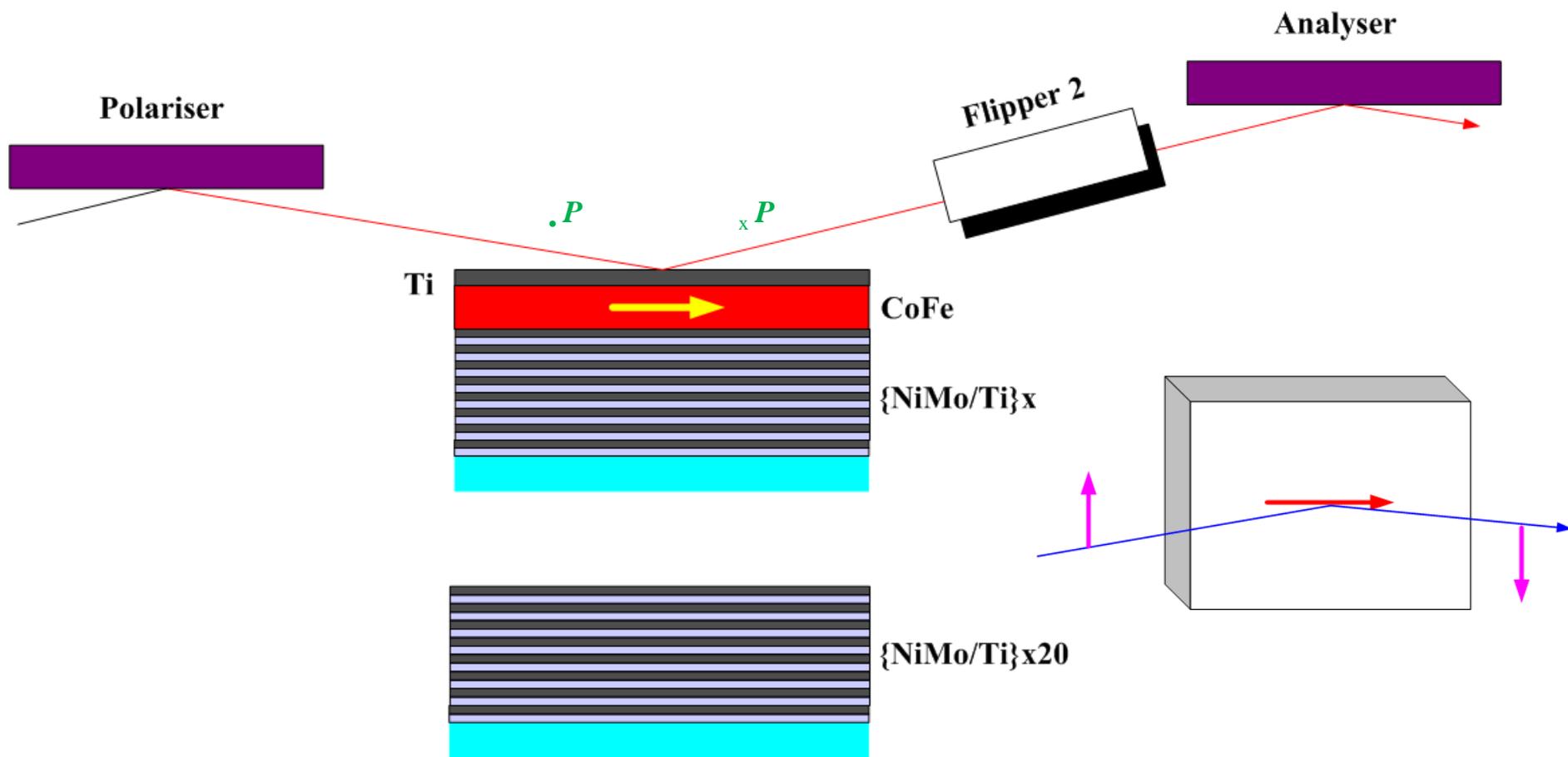
«Нестандартный» метод определения эффективности флипперов



Между поляризатором и анализатором пропускание $R_+ \neq R_-$

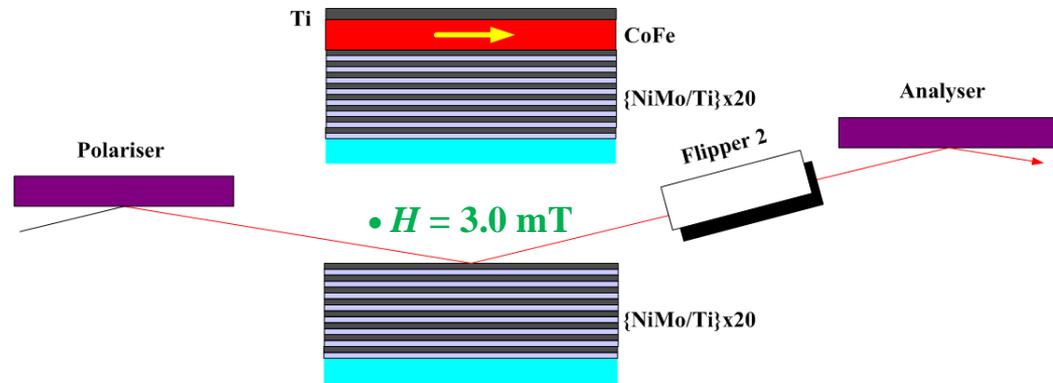
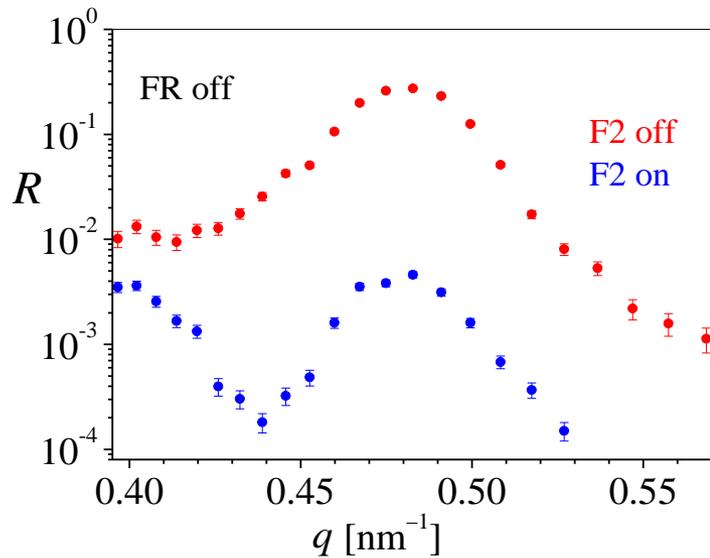
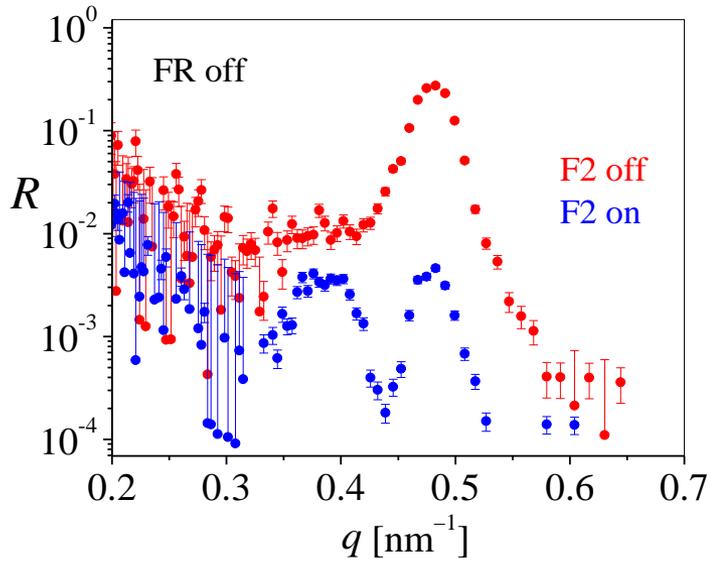
Первый нейтронный отражатель-флиппер

«Нестандартный» метод определения эффективности флипперов



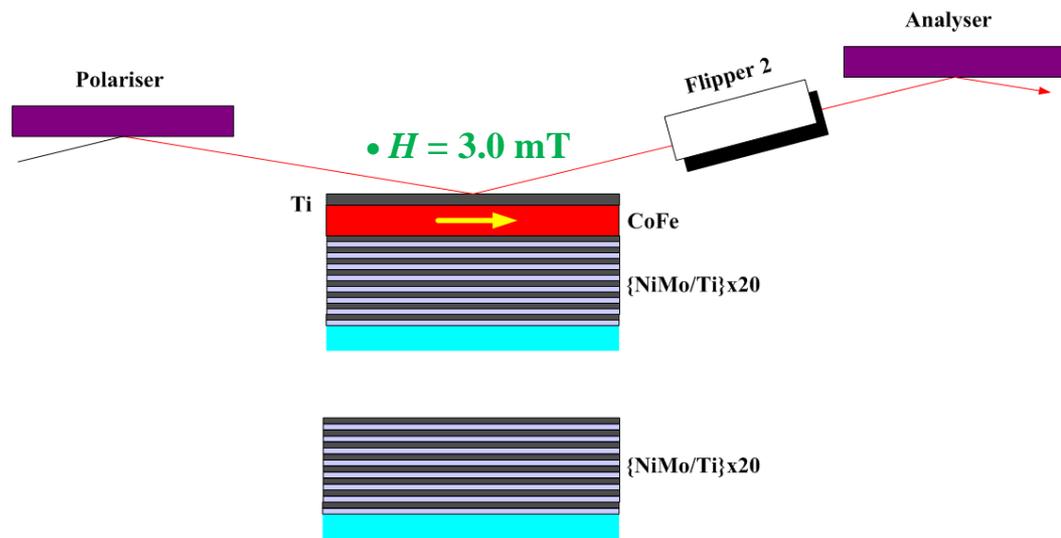
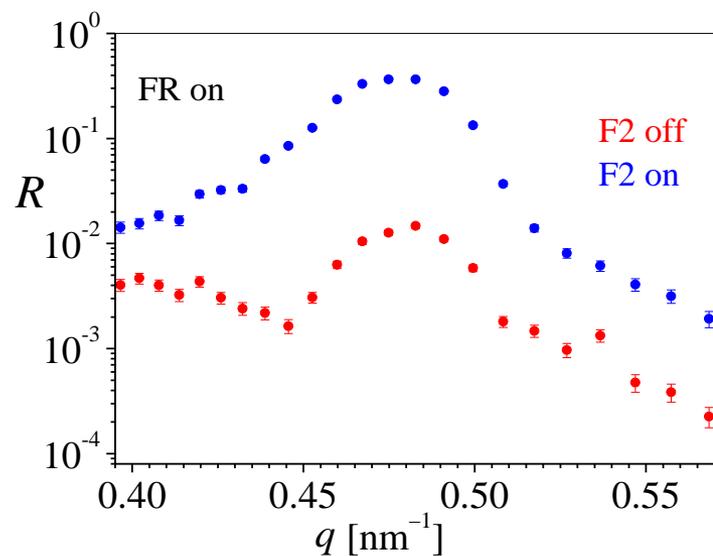
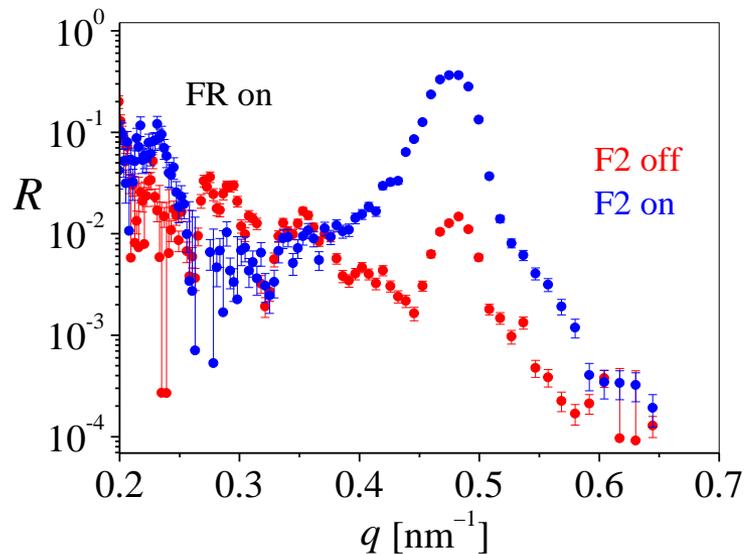
Первый нейтронный отражатель-флиппер

«Нестандартный» метод определения эффективности флипперов



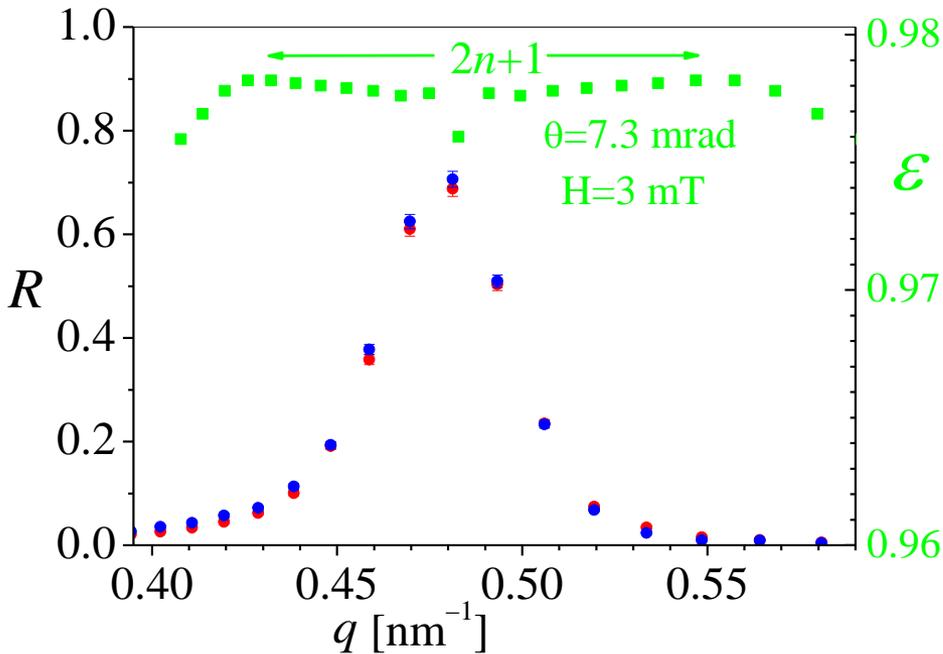
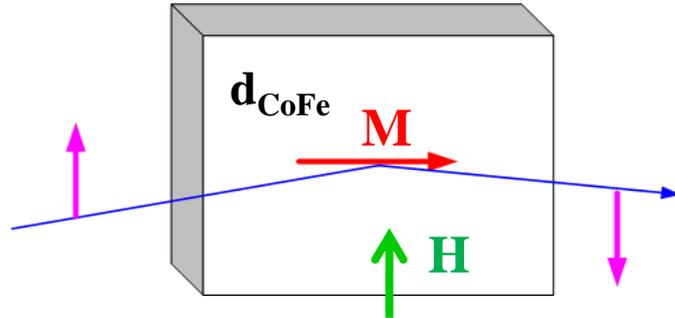
Первый нейтронный отражатель-флиппер

«Нестандартный» метод определения эффективности флипперов



Первый нейтронный отражатель-флиппер

«Нестандартный» метод определения эффективности флипперов



$H = 3.0 \text{ mT}$

$$F_1 = 0.978 \pm 0.001$$

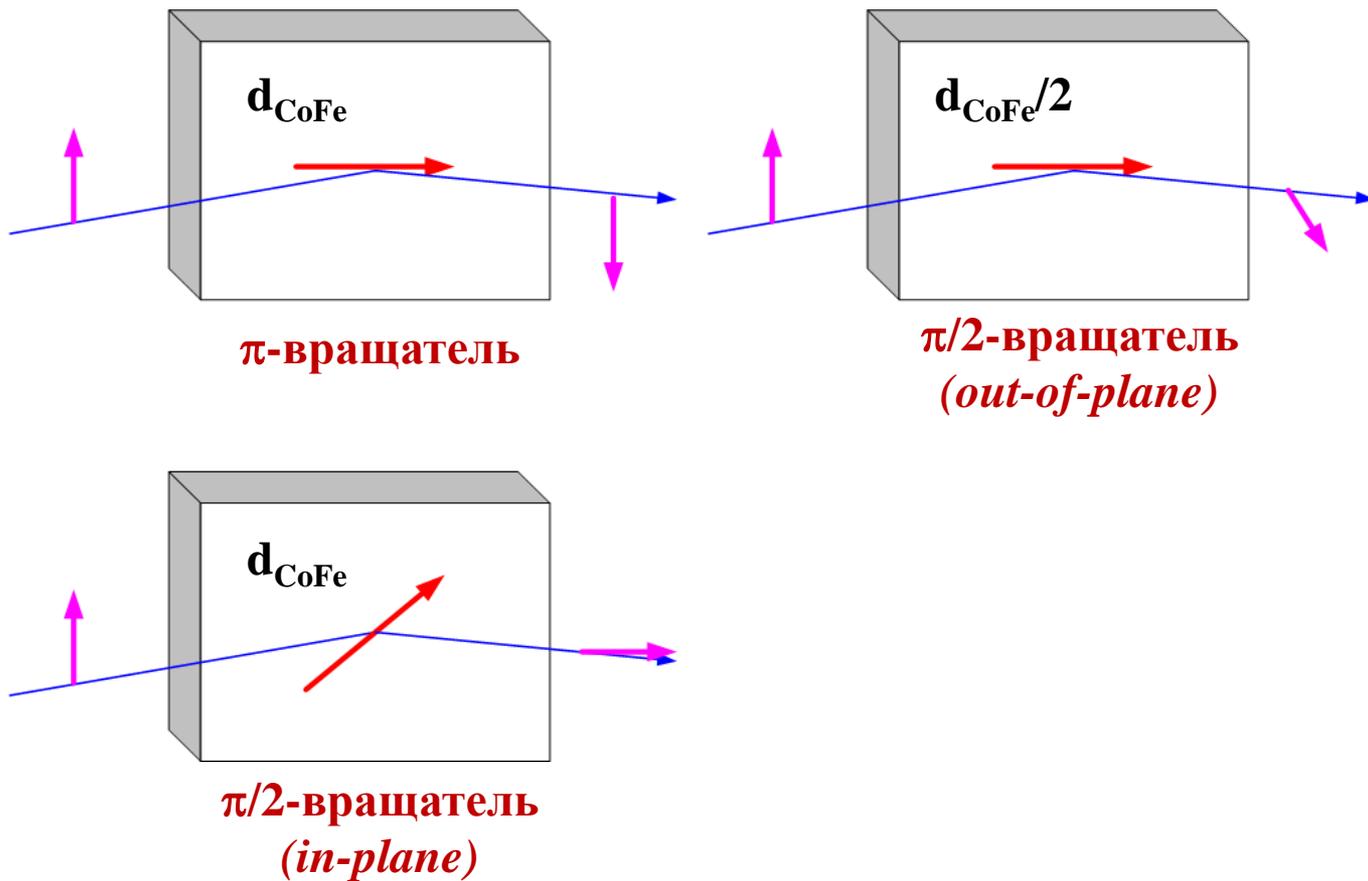
$$F_2 = 0.9985 \pm 0.0020$$

$$P_0 P_A = 0.973 \pm 0.002$$

$$P_0 = 0.986 \pm 0.002$$

$$P_A = 0.987 \pm 0.005$$

Нейтронные отражатели-вращатели спина

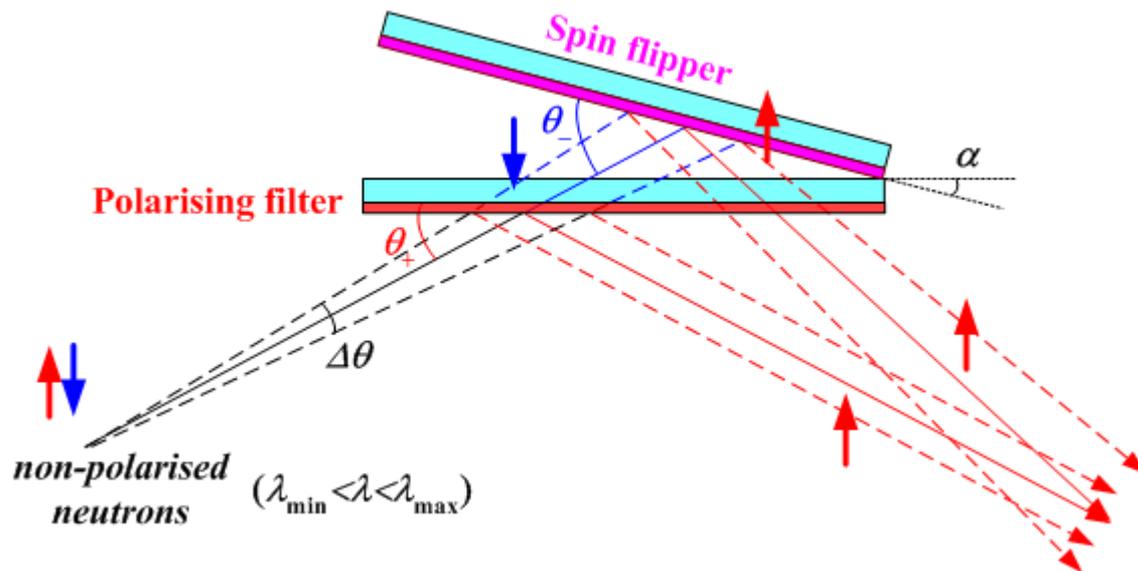


Нейтронно-оптические гиперполяризаторы

Определения:

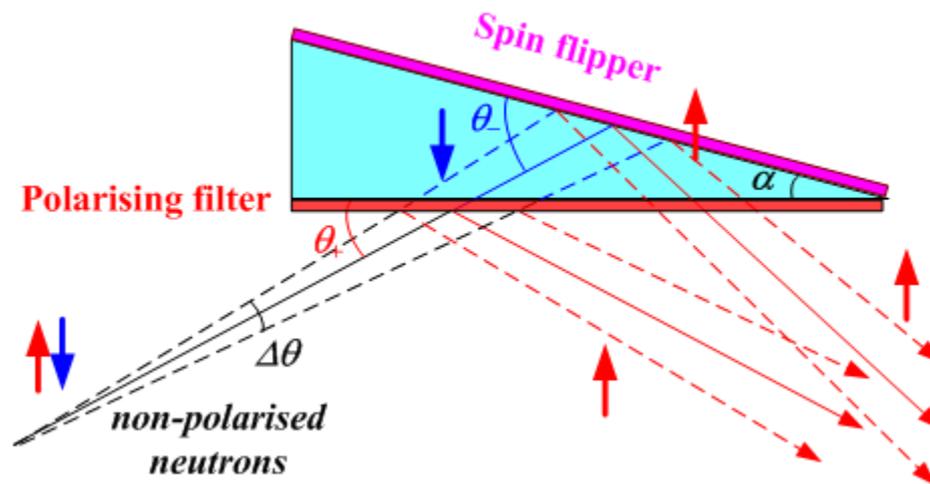
- Обычные поляризаторы – это спиновые селекторы, пропускающие нейтроны с желательным спином (50%) и не пропускающие нейтроны с «неправильным» спином (50%).
- Гиперполяризаторы – устройства, которые не только разделяют нейтроны с противоположными спинами, но и флиппируют «неправильные» спины, таким образом поляризуя более 50% (до 100%) нейтронов
- Выигрыш в интенсивности может быть получен только с соответствующим увеличением углового расхождения (гиперполяризаторы типа I) или ширины пучка (гиперполяризаторы типа II), так что полный фазовый объем, удвоенный спиновым подпространством, сохраняется – в полном соответствии с теоремой Лиувилля.

Нейтронно-оптические гиперполяризаторы типа I



Только нейтроны со спином вверх отражаются от **поляризующего фильтра**, нейтроны со спином вниз отражаются от **флиппирующего покрытия** на пластине, повернутой таким образом, что отраженные со спином вверх нейтроны проходят через поляризующий фильтр под большими углами и без отражения.

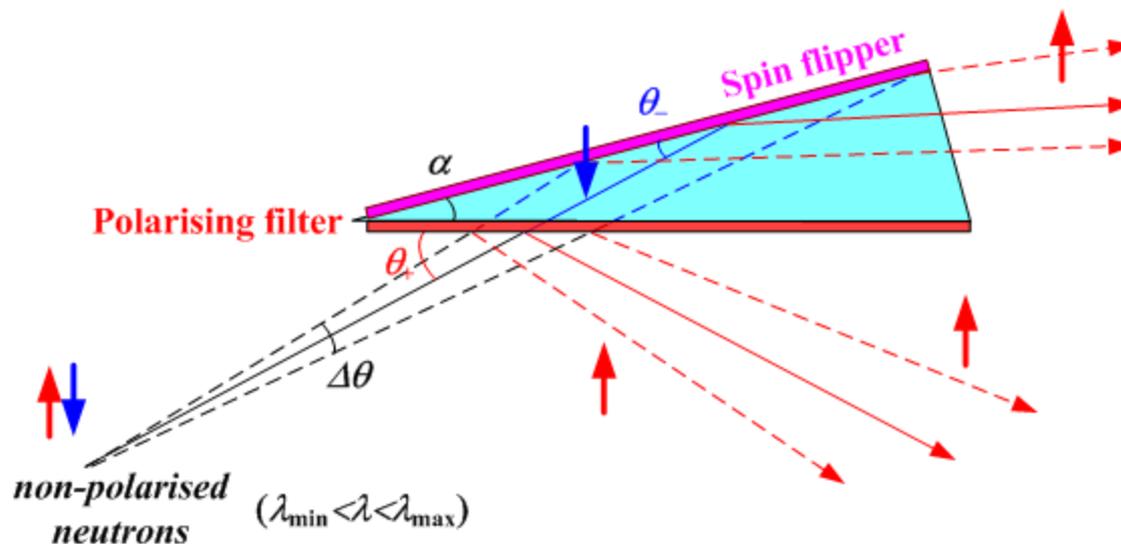
Нейтронно-оптические гиперполяризаторы типа I



КЛИНОВИДНАЯ ПОДЛОЖКА

Только нейтроны со спином вверх отражаются от **поляризующего фильтра**, нейтроны со спином вниз отражаются от **флиппирующего покрытия** на пластине, подвернутой таким образом, что отраженные со спином вверх нейтроны проходят через поляризующий фильтр под большими углами и без отражения.

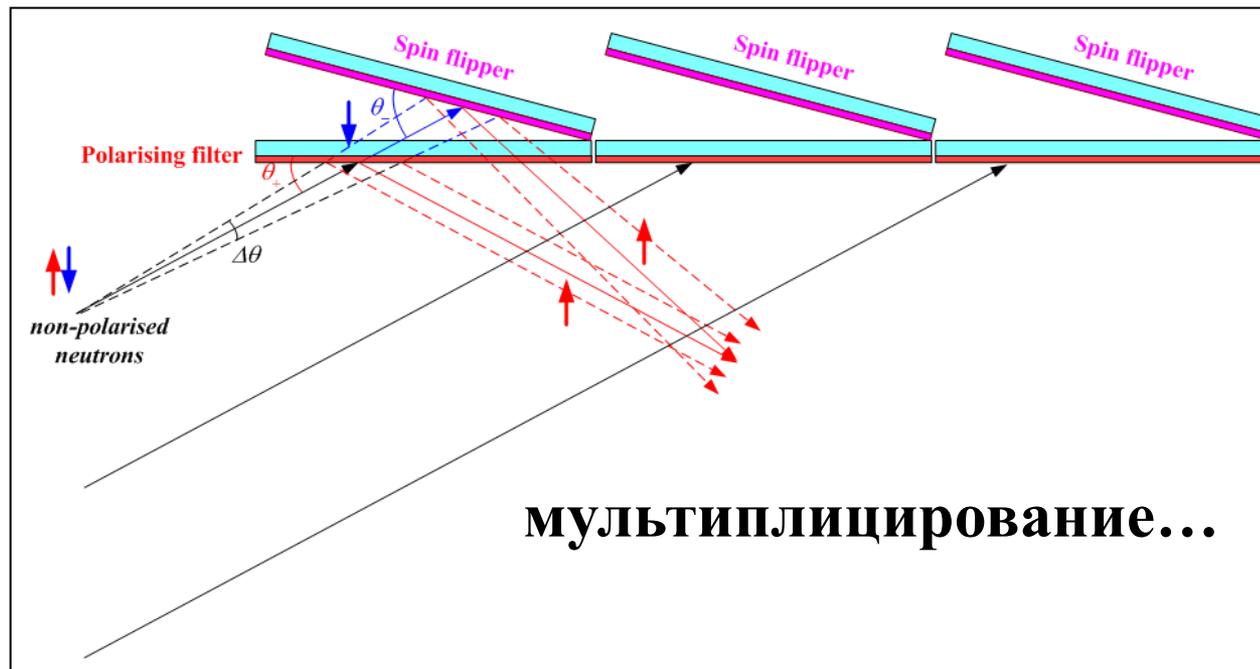
Нейтронно-оптические гиперполяризаторы типа I



КЛИНОВИДНАЯ ПОДЛОЖКА

Только нейтроны со спином вверх отражаются от **поляризирующего фильтра**, нейтроны со спином вниз отражаются от **флиппирующего покрытия** на пластине, подвернутой таким образом, что отраженные со спином вверх нейтроны проходят через поляризирующий фильтр под большими углами и без отражения.

Нейтронно-оптические гиперполяризаторы типа I



Нейтронно-оптические гиперполяризаторы типа I

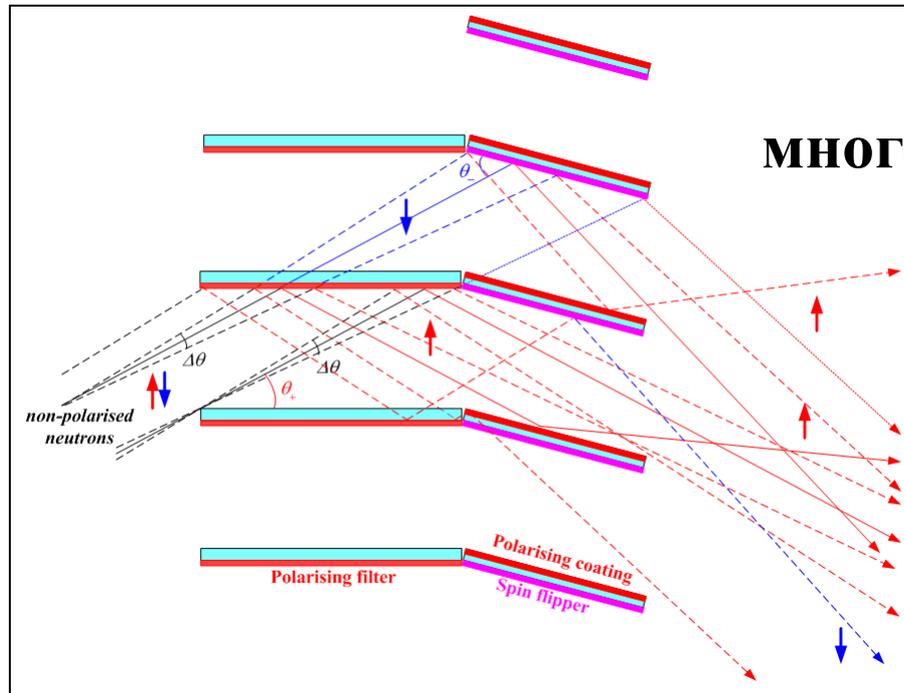
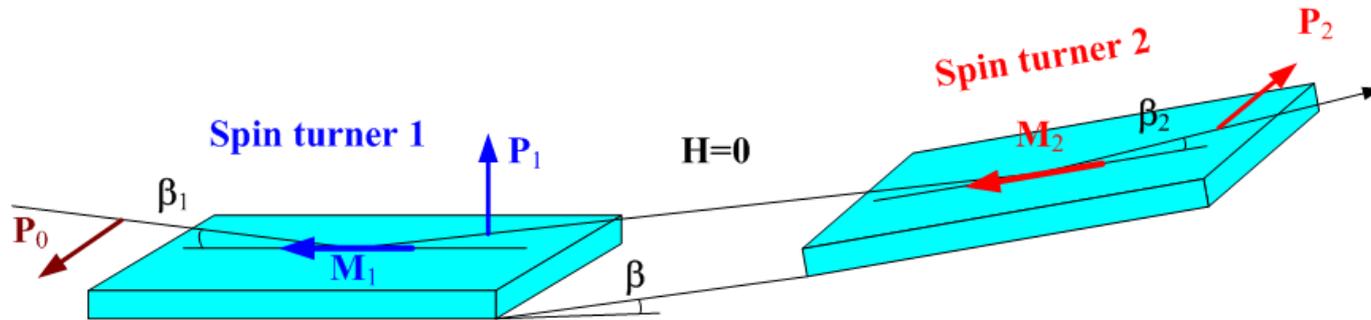


Схема вращателя спина с двойным отражением для монохроматических пучков



- Все лучи, последовательно отраженные от двух зеркал с отражающими поверхностями под углом β друг к другу отклоняются на один и тот же угол

$$2(\beta_1 + \beta_2) = 2\beta$$

- Для вращателей спина на основе однослойного ЛПП

$$\varphi = 2dCB\lambda \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \right) = 2dCB\lambda \left(\frac{1}{\beta + \Delta\beta} + \frac{1}{\beta - \Delta\beta} \right) \cong 4dCB\lambda / \beta$$

- Для квантовых вращателей спина на основе спин-расщепляющих покрытий

$$\varphi = 4\pi(\beta_1 + \beta_2) D/\lambda = 4\pi\beta D/\lambda$$

- Угол φ можно менять, меняя β . В частности, для флиппера: $\varphi = \pi$.

ВЫВОДЫ

- **П**остроен первый отражатель-флиппер для монохроматических нейтронов с эффективностью около 98%
- **П**редложен метод измерения эффективности отражателя-флиппера.
- **П**оказана принципиальная возможность создания элементов нейтронной спин-манипуляционной оптики, которая может принести дополнительные инструментальные возможности.
- **Д**ля раскрытия потенциала инновационной оптики необходимы исследования поляризационных явлений при отражении нейтронов от реальных магнитных структур



**Спасибо
за внимание!**