



III Школа по Физике Поляризованных Нейтронов

17-18 декабря 2015 г. ПИЯФ НИЦ КИ, г. Гатчина

Старые способы поляризации нейтронов

Валярова А. Р. (СПбГУ, Санкт-Петербург)

Метод пропускания образца сквозь намагниченный образец

Сечения рассеяния нейтронов, спины которых направлены вдоль и против направления намагничивания, могут быть записаны в виде

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\pm} = b^2 + f_M^2 \pm 2b|f_M|,$$

где b и f_M – амплитуды соответственно ядерного и магнитного сечения.

Для неполяризованного пучка

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{+} + \frac{1}{2} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{-}.$$

Поляризация нейтронного пучка имеет вид

$$P = \frac{I_{-} - I_{+}}{I_{-} + I_{+}} = \frac{\exp(Nd\sigma_1) - \exp(-Nd\sigma_1)}{\exp(Nd\sigma_1) + \exp(-Nd\sigma_1)} = \text{th}(Nd\sigma_1) = \text{th}\left(2Nd \int d\Omega b|f_M|\right)$$

где N – число ядер в единице объема, d – толщина образца, I_{-} и I_{+} – интенсивности после образца для нейтронов, поляризованных соответственно против и вдоль направления намагничивания.

Метод пропуска образца сквозь намагниченный образец

Недостатки данного метода:

- наличие намагниченного до насыщения образца, в противном случае произойдет деполяризация пучка в самом образце;
- наличие сильных намагничивающих полей;
- проблема выбора оптимальной толщины образца;
- не подходит для случая холодных нейтронов.

Метод дифракции на ферромагнитных кристаллах

Интенсивность когерентного магнитного рассеяния неполяризованных нейтронов на ферромагнетике, намагниченном до насыщения, пропорциональна множителю:

$$q^2 = 1 - (\mathbf{e}\mathbf{h})^2$$

где \mathbf{h} и \mathbf{e} – единичные векторы в направлениях намагничивания и изменения импульса нейтрона при рассеянии соответственно. Рассмотрим два крайних случая:

а) $\mathbf{e} \uparrow\uparrow \mathbf{h}$, при этом $q^2 = 0$;

б) $\mathbf{e} \perp \mathbf{h}$, при этом $q^2 = 1$.

Можно подобрать для данного монокристаллического образца такое брэгговское отражение и такое направление намагничивания, чтобы выполнялось следующее условие:

$$b_{\text{ког}} = |f_{\text{M}}|$$

Метод дифракции на ферромагнитных кристаллах

Испытав такое отражение, неполяризованный нейтронный пучок станет почти полностью поляризованным, поскольку для указанного отражения

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{-} = (b_{\text{ког}} - |f_{\text{M}}|)^2 = 0$$

и, следовательно, отражаться будут только те нейтроны, спин которых ориентирован по полю.

Достоинства данного метода:

- возможность получения поляризации, существенно более высокую ($p \approx 0,95$), нежели в методе пропускания;
- использование значительно более слабых магнитных полей.

Недостаток данного метода:

- неприменим для получения поляризованных пучков холодных нейтронов.

Метод отражения от намагниченных зеркал

Критические углы определяются следующим соотношением:

$$\varphi_{\text{кр}} = \lambda \left[\frac{N}{\pi} b_{\text{ког}} \pm \frac{m}{2\pi^2 \hbar^2} \mu B \right]^{\frac{1}{2}}$$

где λ , μ , m – длина волны, магнитный момент и масса нейтрона, B – магнитная индукция, $b_{\text{ког}}$ – когерентная амплитуда ядерного рассеяния на закрепленном ядре.

Данный метод поляризации вряд ли был бы практически удобным, если бы не существовало материалов, для которых при соответствующем намагничивании выполнялось условие

$$N b_{\text{ког}} < \frac{\mu B m}{2\pi \hbar^3}$$

При выполнении данного условия намагниченное кобальтовое зеркало практически совсем не будет отражать нейтроны, спины которых направлены против намагничивающего поля, поскольку для таких нейтронов эффективная когерентная амплитуда

$$b_{\text{эфф}}^- = \left[b_{\text{ког}} - \frac{\mu B m}{2N\pi \hbar^2} \right] < 0.$$

Метод отражения от намагниченных зеркал

В случае *a* направление намагничивания перпендикулярно, а в случаях *б* и *в* – параллельно отражающей поверхности, причем в случае *б* вектор \mathbf{V} лежит в плоскости падающего и отраженного пучков, тогда как в случае *в* он перпендикулярен к этой плоскости.

Из трех вариантов осуществляются только два последних (*б* и *в*).

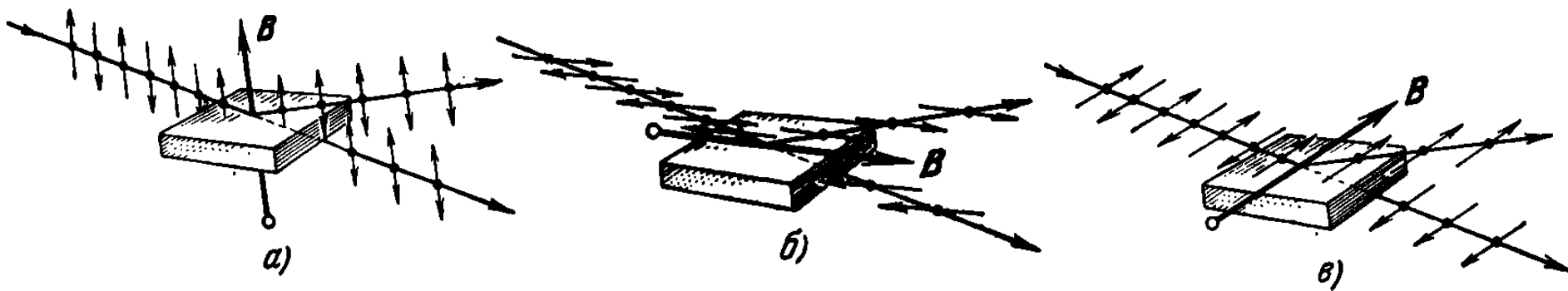


Рис. 1. Три варианта отражения нейтронов от намагниченного зеркала.

Метод отражения от намагниченных зеркал

Из рисунка видно, что насыщение достигается при напряженности поля порядка 1000 э.

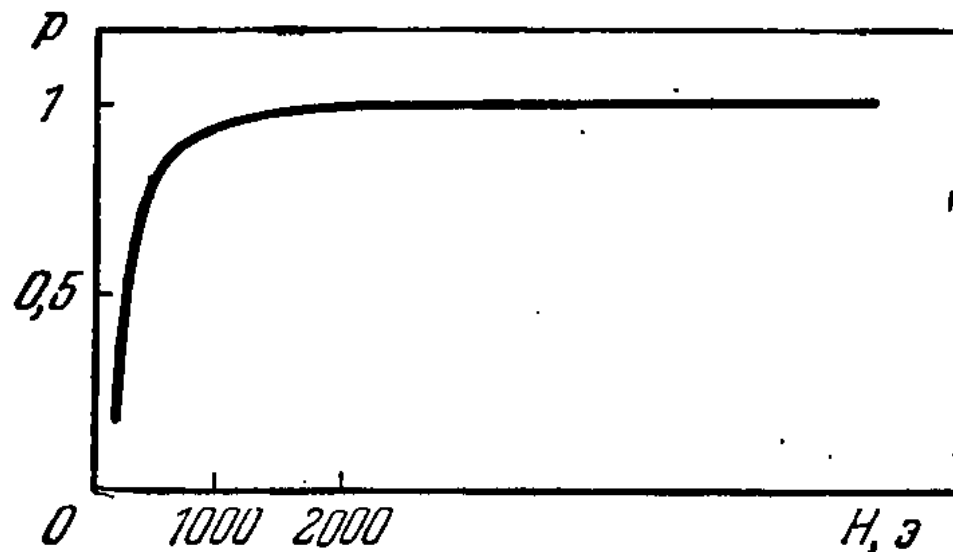


Рис. 2. Зависимость степени поляризации нейтронов кристаллом CoFe от напряженности намагничивающего поля.

Метод отражения от намагниченных зеркал

Достоинства данного метода:

- применим к нейтронам различных энергий, включая область холодных нейтронов;
- позволяет получить практически полностью поляризованные нейтронные пучки высокой интенсивности (до 10^8 нейтронов/сек).

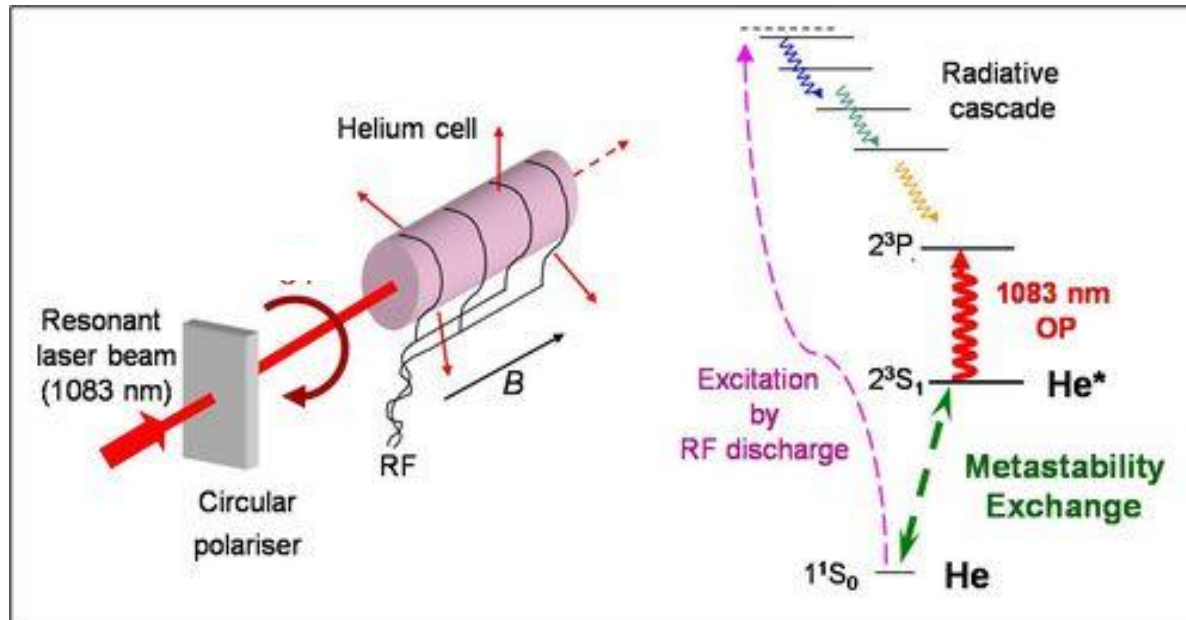
Недостаток данного метода:

- со стороны высоких энергий имеет ограничение, связанное с уменьшением критического угла скольжения при увеличении энергий нейтронов.

Поляризация нейтронов He^3 поляризаторами

Основные методики поляризации ядер He^3 :

- Оптическая накачка с обменом метастабильностью (МЕОР – Metastability-Exchange Optical Pumping)
- Спин-обменная оптическая накачка (SEOP – Spin-Exchange Optical Pumping)



Слева: схематическое изображение эксперимента по оптической накачке. **Справа:** диаграмма энергетических уровней ^3He .

Поляризация нейтронов He^3 поляризаторами

Достоинства данного метода:

- высокая эффективность как для холодных, так и горячих нейтронов;
- сохранение прямолинейных траекторий нейтронов;
- компактность и легкое изменение размеров и формы;
- и др.

Недостатки данного метода:

- степенная зависимость пропускания от длины волны: $T_+(\lambda) = [T_+(\lambda_0)]^{\lambda/\lambda_0}$;
- технологическая сложность;
- падение поляризации с течением времени (МЕОР);
- длительное время оптической накачки (SEOP) до 2-4 суток;
- высокая стоимость оборудования и его обслуживания.

Спасибо за внимание!