Магнетизм сверхрешеток

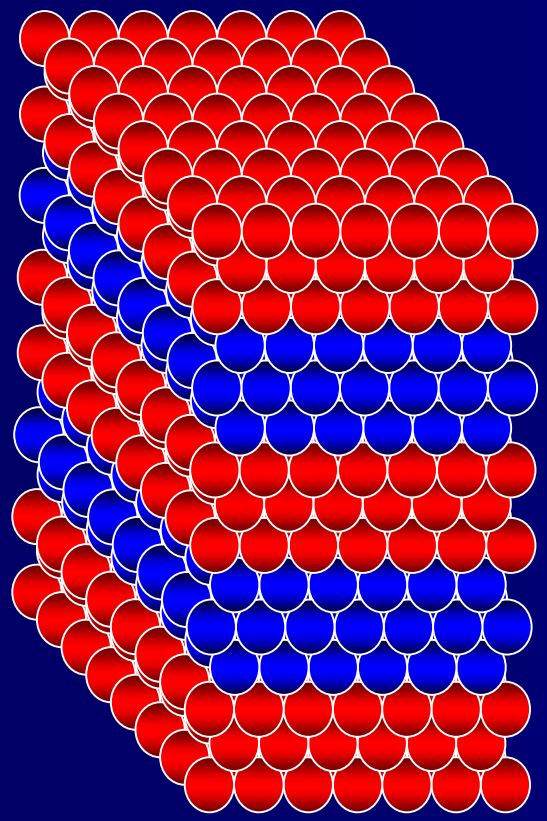
редкоземельный металл/переходный металл

Е.А. Кравцов

Институт физики металлов УрО РАН

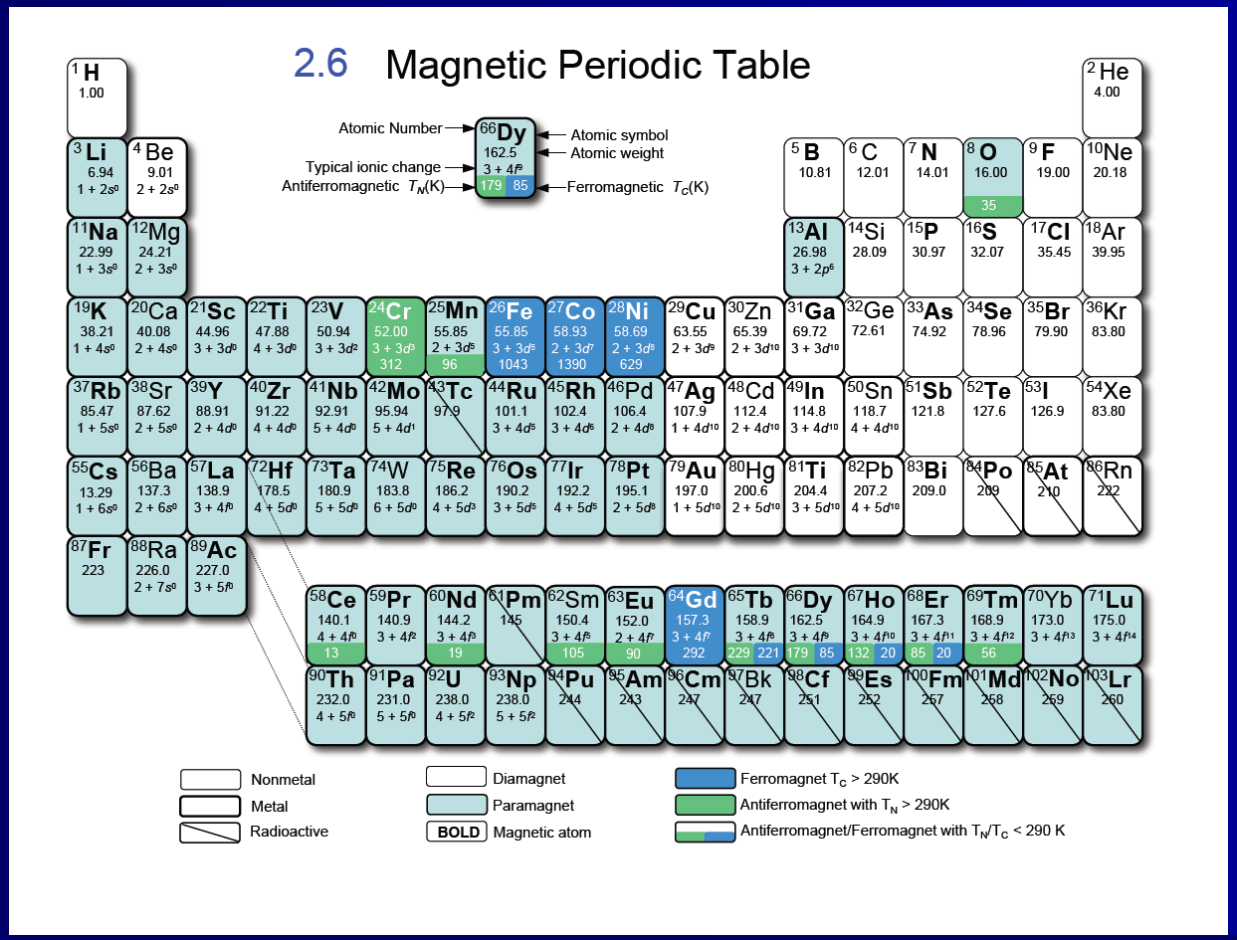
III Совещание по Малоугловому Рассеянию Нейтронов «МУРомец-2015»,
Гатчина, 25 сентября 2015 г.

Многослойные металлические магнитные наногетероструктуры

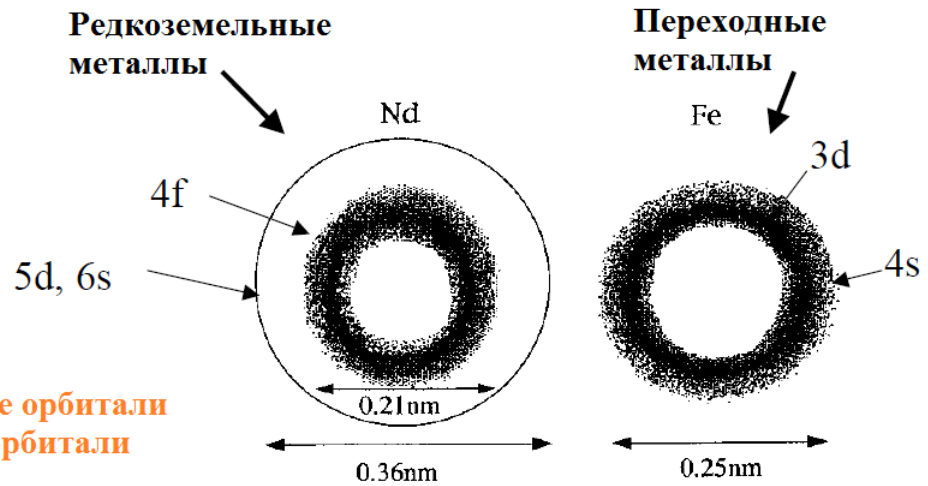


- Чередующиеся слои различных металлов
- Слои толщиной в единицы-десятки атомных монослоев
- Прецизионный контроль толщины отдельных слоев и качества межслойных границ
- Новый класс искусственных магнитных материалов

Магнитные элементы

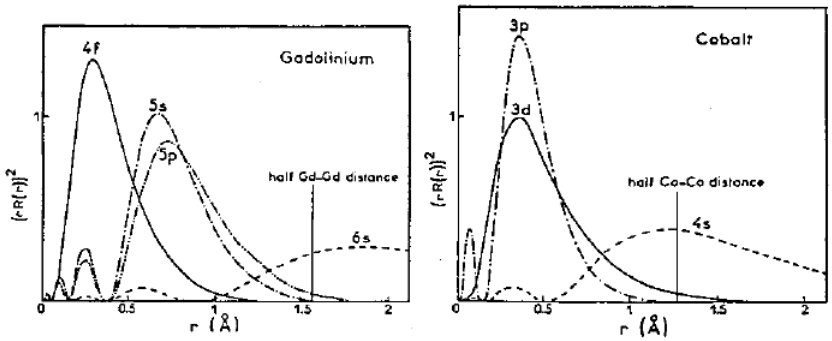


Две главные серии магнитных элементов

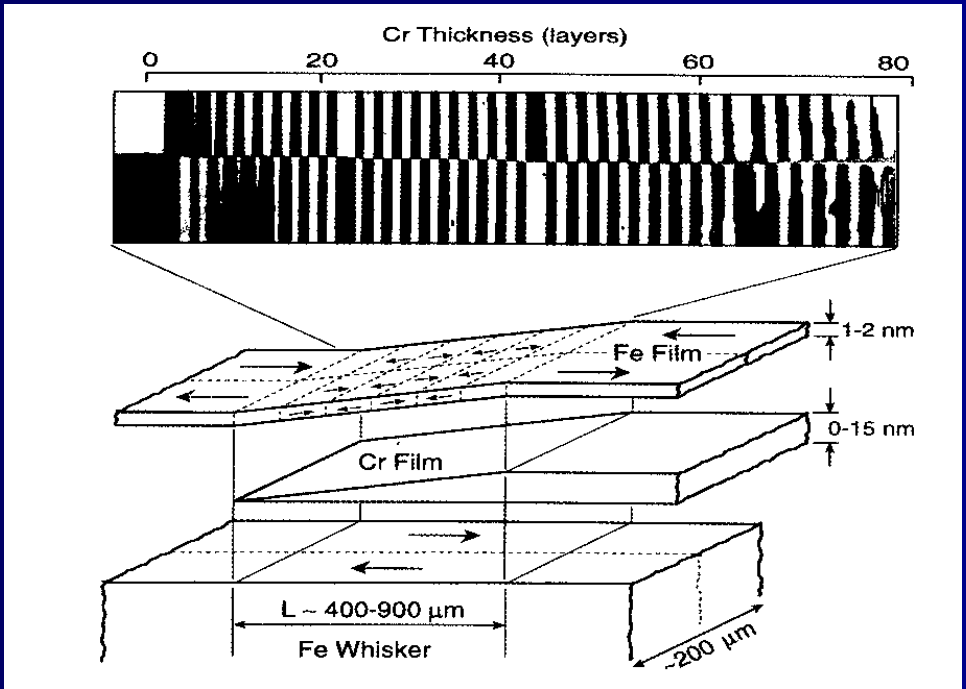


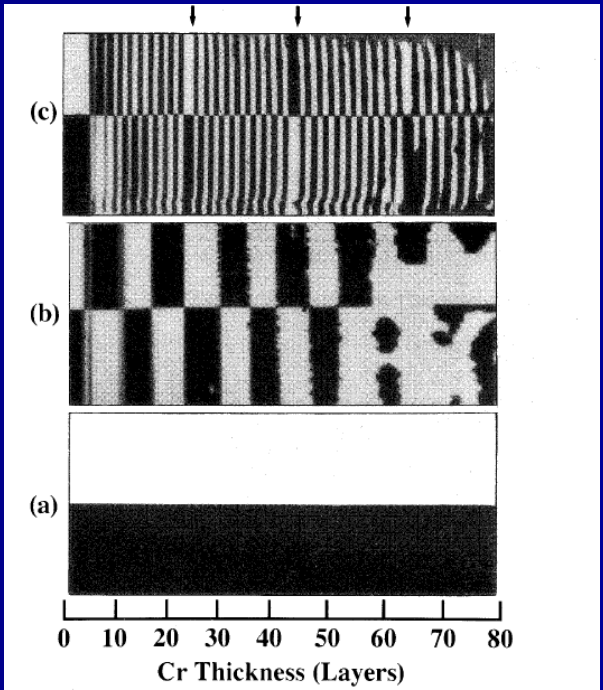
4f электроны - внутренние орбитали
5d электроны - внешние орбитали

Принципиально различное поведение



Сверхрешетки из переходных металлов: осциллирующее межслойное обменное взаимодействие (Fe/Cr)

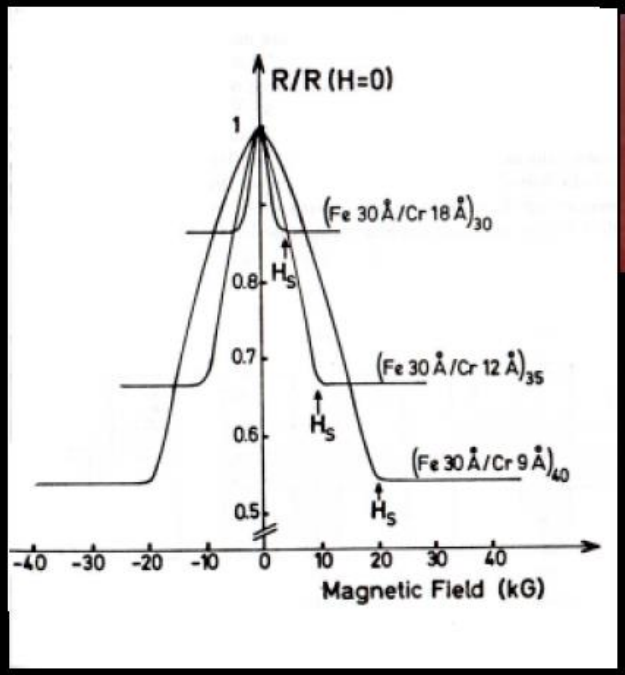




Гигантское магнетосопротивление в сверхрешетках Fe/Cr: Нобелевская премия 2007 года

Peter Grünberg

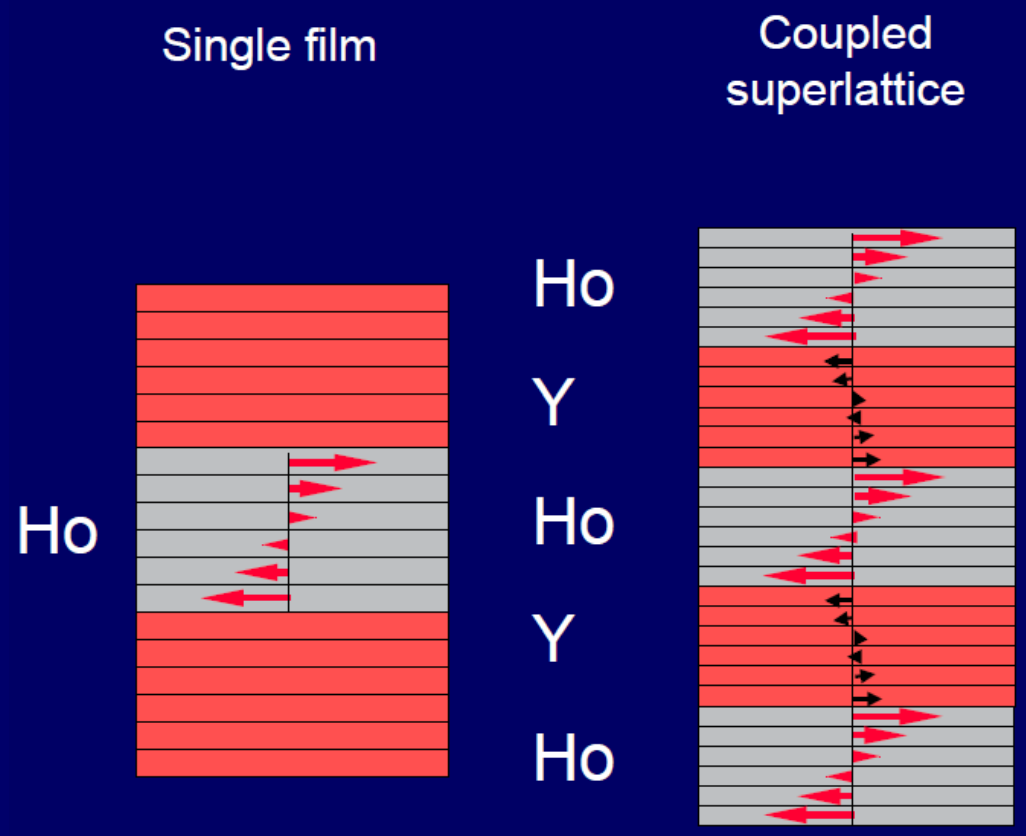
Phys. Rev. B39, 4282 (1989)



Albert Fert

Phys. Rev. Lett. 61, 2472 (1988)

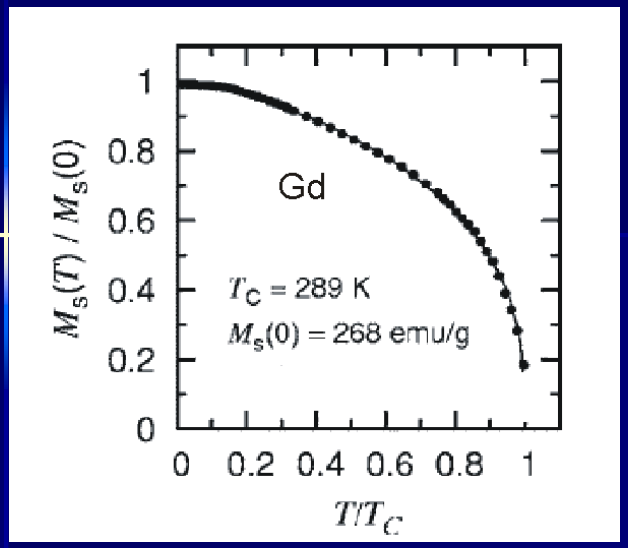
Сверхрешетки из РЗ металлов: обменное взаимодействие через немагнитные прослойки



Магнитные моменты редкоземельных элементов

элемент Ln	Конфиг. Ln^{3+}	основное состояние	число неспар. e^-	Теор. μ_{eff}/μ_B	наблюдаемое μ_{eff}/μ_B
La	$4f^0$	$^1S_0$	0	0	0
Ce	$4f^1$	$^2F_{5/2}$	1	2.54	2.3 - 2.5
Pr	$4f^2$	$^3H_4$	2	3.58	3.4 - 3.6
Nd	$4f^3$	$^4I_{9/2}$	3	3.62	3.5 - 3.6
Pm	$4f^4$	$^5I_4$	4	2.68	-
Sm	$4f^5$	$^6H_{5/2}$	5	0.85	1.4 - 1.7
Eu	$4f^6$	$^7F_0$	6	0	3.3 - 3.5
Gd	$4f^7$	$^8S_{7/2}$	7	7.94	7.9 - 8.0
Tb	$4f^8$	$^7F_6$	6	9.72	9.5 - 9.8
Dy	$4f^9$	$^6H_{15/2}$	5	10.65	10.4 - 10.6
Ho	$4f^{10}$	$^5I_8$	4	10.6	10.4 - 10.7
Er	$4f^{11}$	$^4I_{15/2}$	3	9.58	9.4 - 9.6
Tm	$4f^{12}$	$^3H_6$	2	7.56	7.1 - 7.6
Yb	$4f^{13}$	$^2F_{7/2}$	1	4.54	4.3 - 4.9
Lu	$4f^{14}$	$^1S_0$	0	0	0

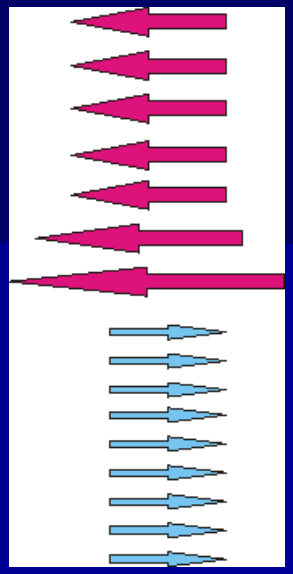
Сверхрешетки Fe/Gd как модельная ферримагнитная система



J_{Gd-Gd} ~ 7.5 pJ/m

J_{Fe-Gd} ~ - 10 pJ/m

J_{Fe-Fe} ~ 20.5 pJ/m



T_c (bulk Fe) = 1043 K
T_c (bulk Gd) = 289 K

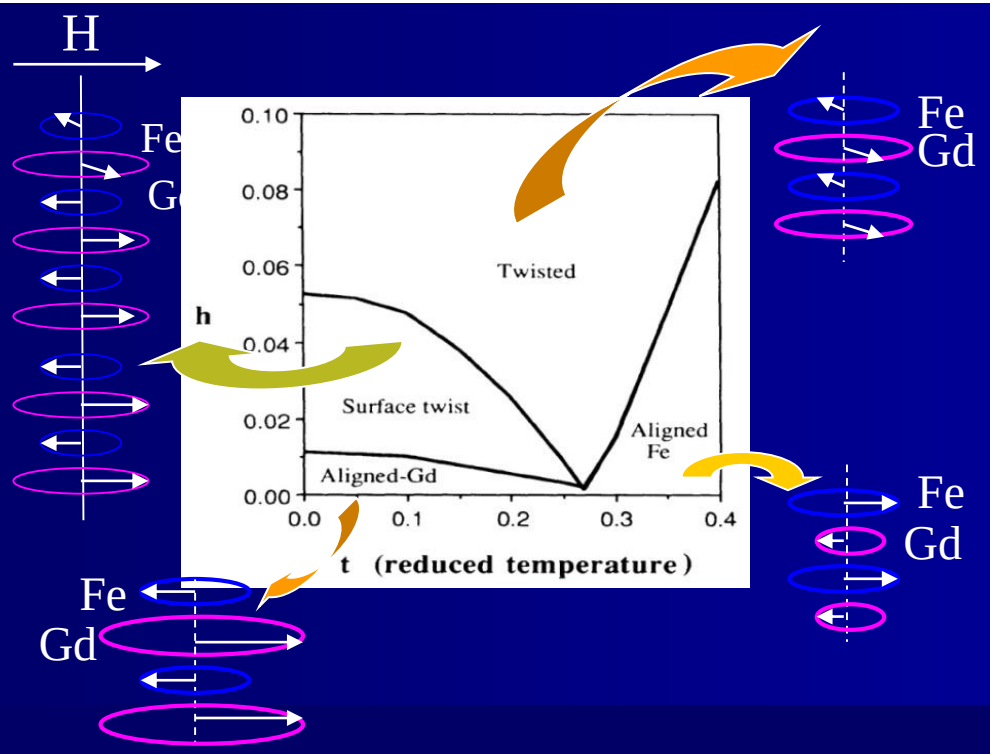
- **Сильная температурная зависимость намагниченности Gd**
- **Сильное внутрислойное обменное взаимодействие в Fe**
- **Сильное антиферромагнитное взаимодействие обменное Fe-Gd**
- **Слабое внутрислойное обменное взаимодействие в Gd**

Сверхрешётки Fe/Gd : магнитная фазовая диаграма

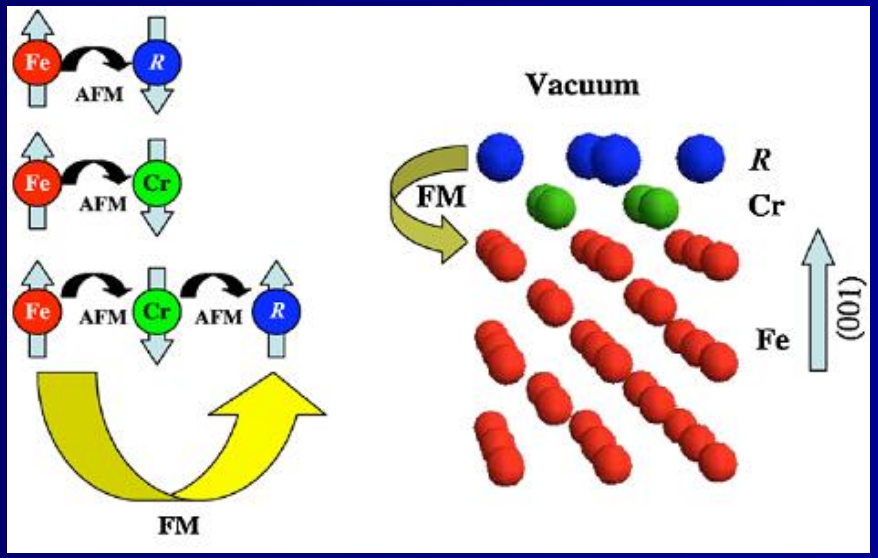
VOLUME 65, NUMBER 9 PHYSICAL REVIEW LETTERS 27 AUGUST 1990

Surface Phase Transitions and Spin-Wave Modes in Semi-Infinite Magnetic Superlattices with Antiferromagnetic Interfacial Coupling

J. G. LePage and R. E. Camley
Department of Physics, University of Colorado, Colorado Springs, Colorado 80933-7150
(Received 19 April 1990)



Новые подходы: модификация межслойного взаимодействия Fe-Gd



Роль дополнительной прослойки Cr:

- Сохранить индуцированный момент в Gd
- Получить фм-упорядочение Fe-Gd
- Системы с большим магнитным моментом при комнатной температуре

Управление обменным взаимодействием Fe-Gd через прослойку Cr

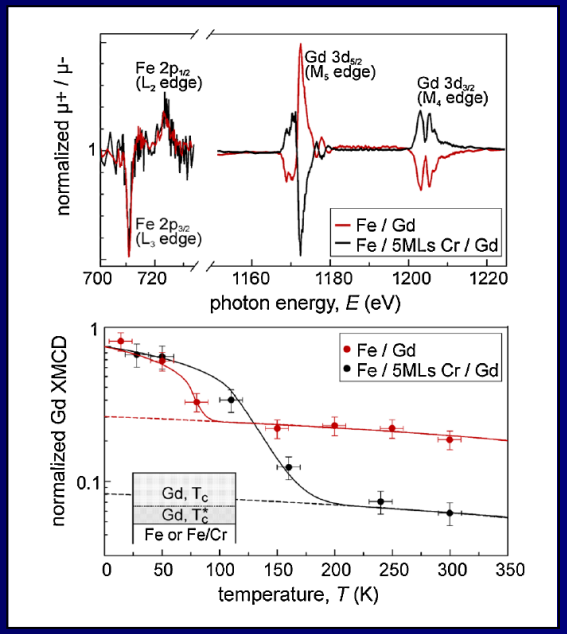
PRL 104, 156402 (2010) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 16 APRIL 2010

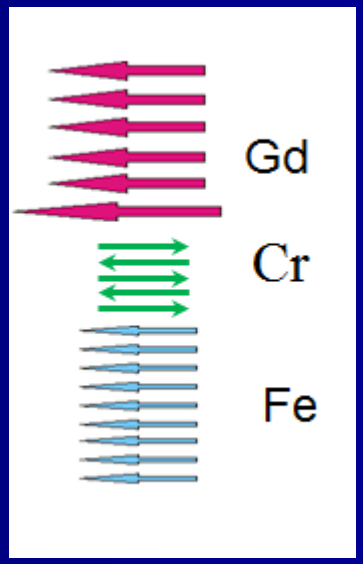
Forcing Ferromagnetic Coupling Between Rare-Earth-Metal and 3*d* Ferromagnetic Films

Biplab Sanyal,[1,*] Carolin Antoniak,[2] Till Burkert,[1] Bernhard Krumme,[2] Anne Warland,[2] Frank Stromberg,[2] Christian Praetorius,[3] Kai Fauth,[3] Heiko Wende,[2] and Olle Eriksson[1]

[1]*Department of Physics and Astronomy, Uppsala University, Box 516, SE-751 20 Uppsala, Sweden*
[2]*Faculty of Physics and Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CeNIDE), University of Duisburg-Essen, Lotharstr. 1, 47048 Duisburg, Germany*
[3]*Faculty of Physics and Astronomy, University of Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Germany*

(Received 6 December 2009; published 15 April 2010)

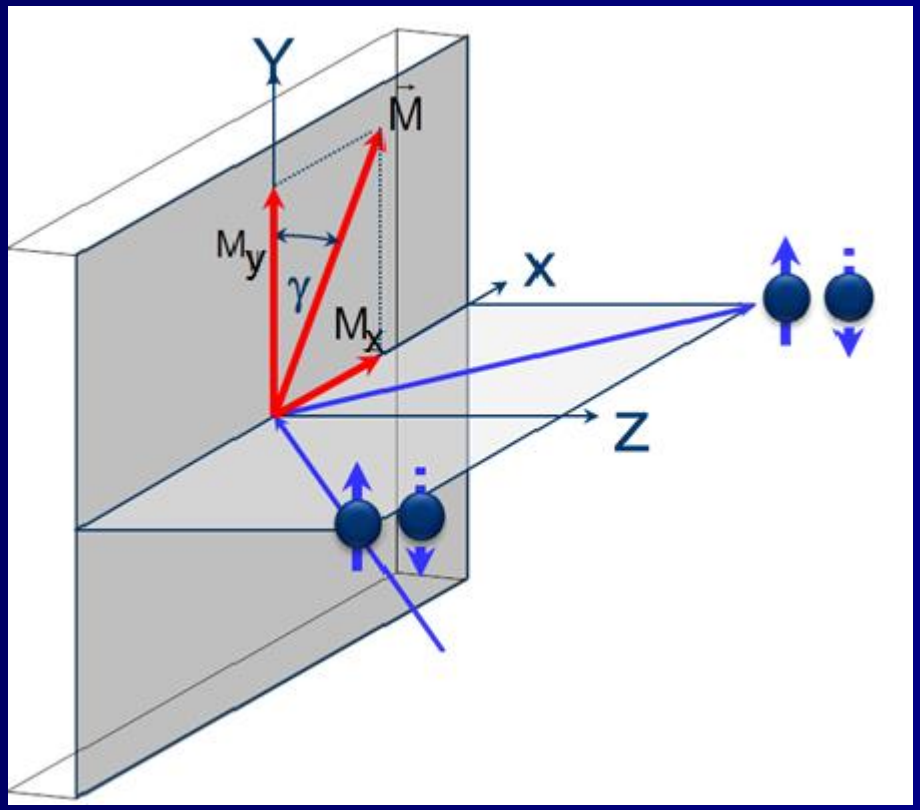




Требования к методикам исследования слоистых наногетероструктур

- Неразрушающие методики
- Определение толщинных профилей вектора намагниченности в отдельных слоях
- Высокое пространственное разрешение
- Элементная чувствительность

Поляризационная нейтронная рефлектометрия



$$R^{++} - R^{--} \propto \langle \cos\gamma \rangle$$

$$R^{+-} = R^{-+} \propto \langle \sin^2\gamma \rangle$$

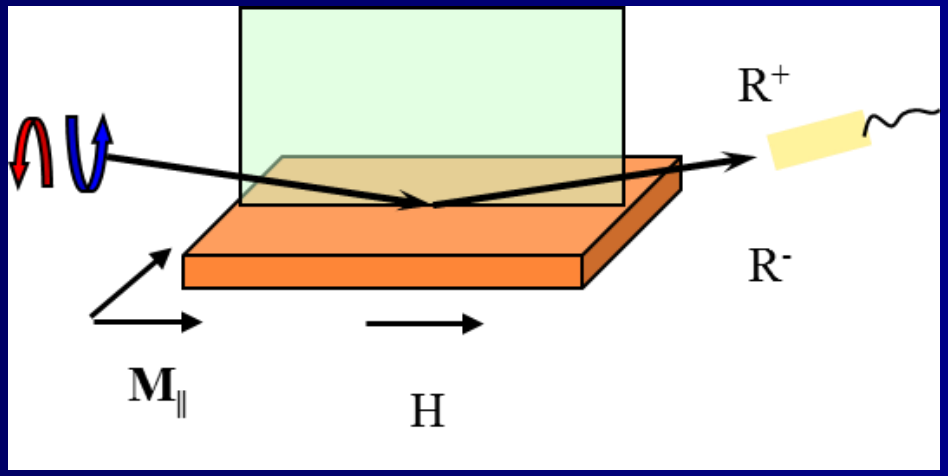
Преимущества поляризационной нейтронной рефлектометрии

- Прямое взаимодействие нейтрона с магнитными моментами, атомные и магнитные сечения рассеяния одного порядка
- Табулированные сечения рассеяния
- Самокалибрующийся метод: определяются магнитные моменты в абсолютных единицах
- Векторная магнитнометрия: определяются две компоненты намагниченности

Недостатки поляризационной нейтронной рефлектометрии

- Нет элементной чувствительности
- Малые интенсивности и недостаточное пространственное разрешение
- Нет единственности решения

Резонансная рентгеновская магнитная рефлектометрия



$$R_+ - R_- \propto M_{\parallel}$$

Преимущества РРМР

- Высокие интенсивности и высокое пространственное разрешение
- Элементная чувствительность

Недостатки PPMP

- Косвенное взаимодействие с магнитными моментами
- Магнитные длины рассеяния на несколько порядков меньше зарядовых
- Измеряется только одна компонента намагниченности
- Длины рассеяния зависят от локальной структуры
- Магнитный момент измеряется в относительных единицах
- Нет единственности решения

Комплементарное применение нейтронных и синхротронных методик

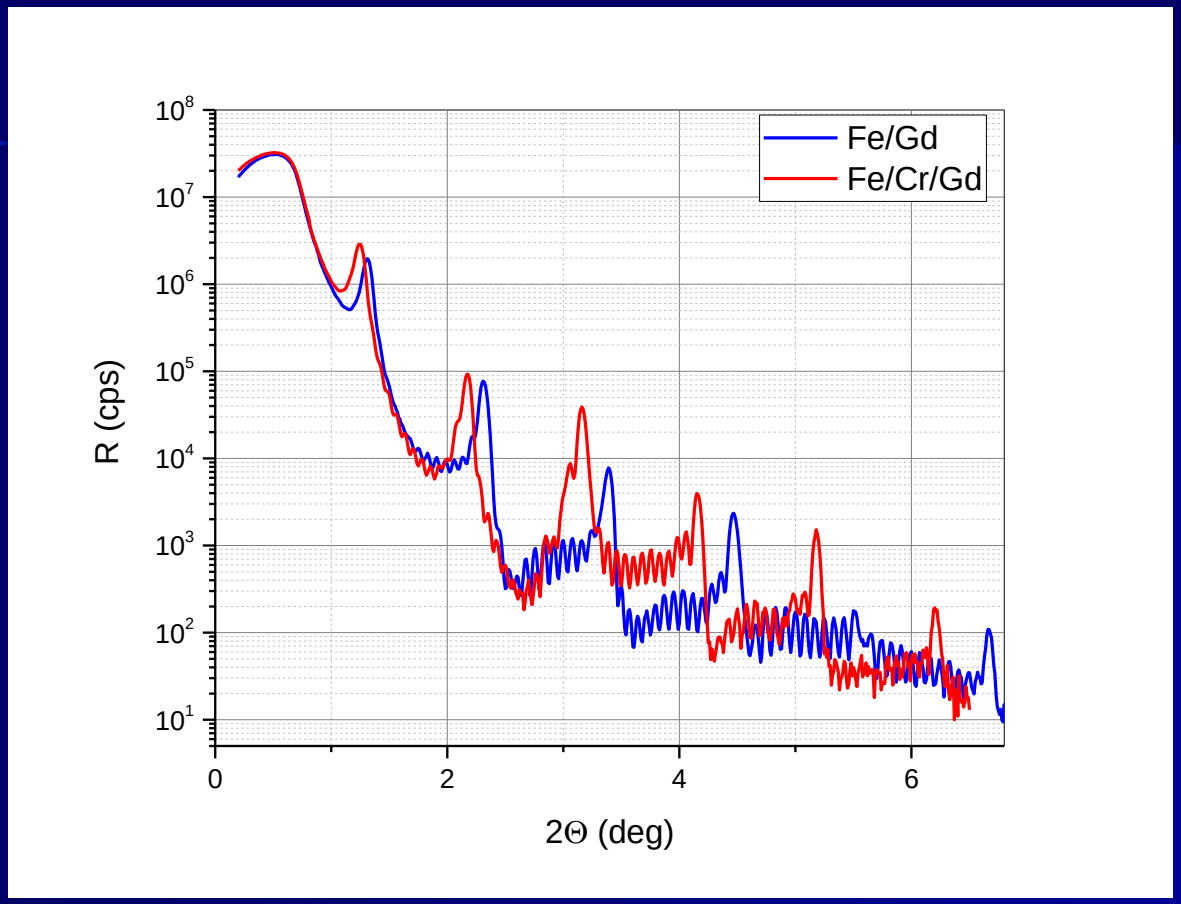
Комбинация двух методов:

- Неразрушающий метод определения толщинных и элементных профилей вектора намагниченности
- Высокое пространственное разрешение
- Самокалибрующийся метод
- Помогает решить проблему единственности решения

Цель: исследовать магнетизм систем с минимальными толщинами Cr прослойки

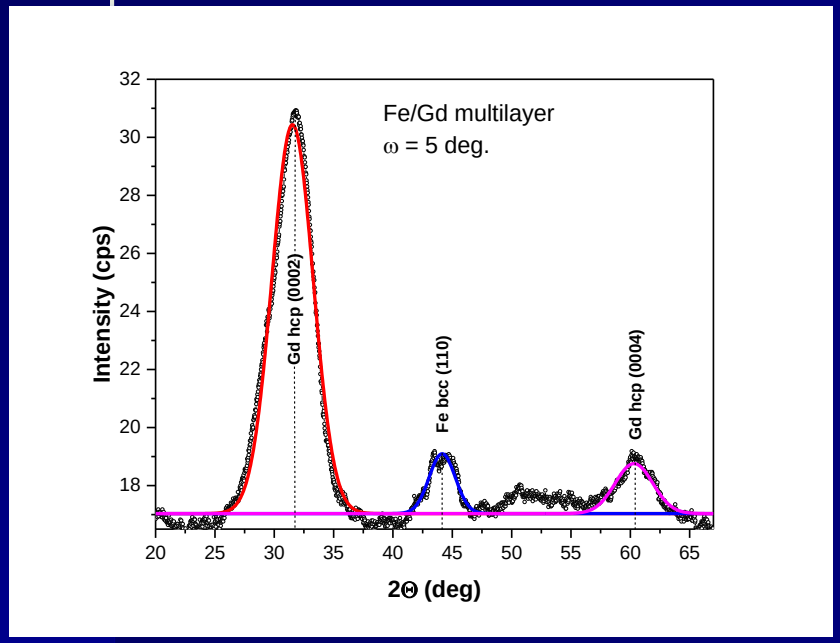
- образцы:[Fe(35 Å)/Cr(t)Gd(50 Å)/Cr(t)]$_{12}$ t = 0, 4.4 A (3 ML)
- Аттестация образца: рентгеновская дифракция & SQUID.
- PNR: REMUR (JINR), NREX (TUM2).
- RXMR: 4-ID-D @ APS (ANL). Gd L_2 absorption edge (7929 eV).
- Анализ: одновременный фит XR, PNR & RXMR.

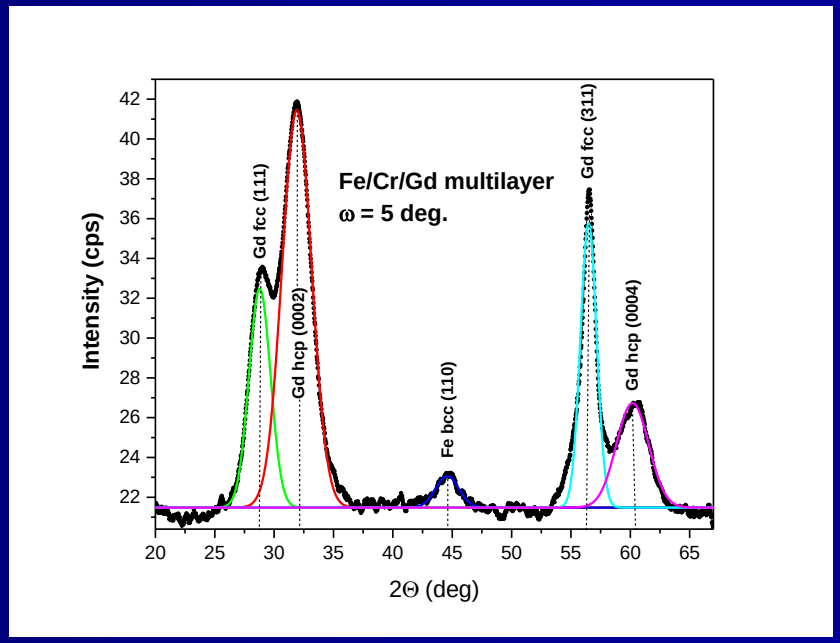
Рентгеновская рефлектометрия



Хорошо определенная слоистая структура, ск шероховатости 1-3 А

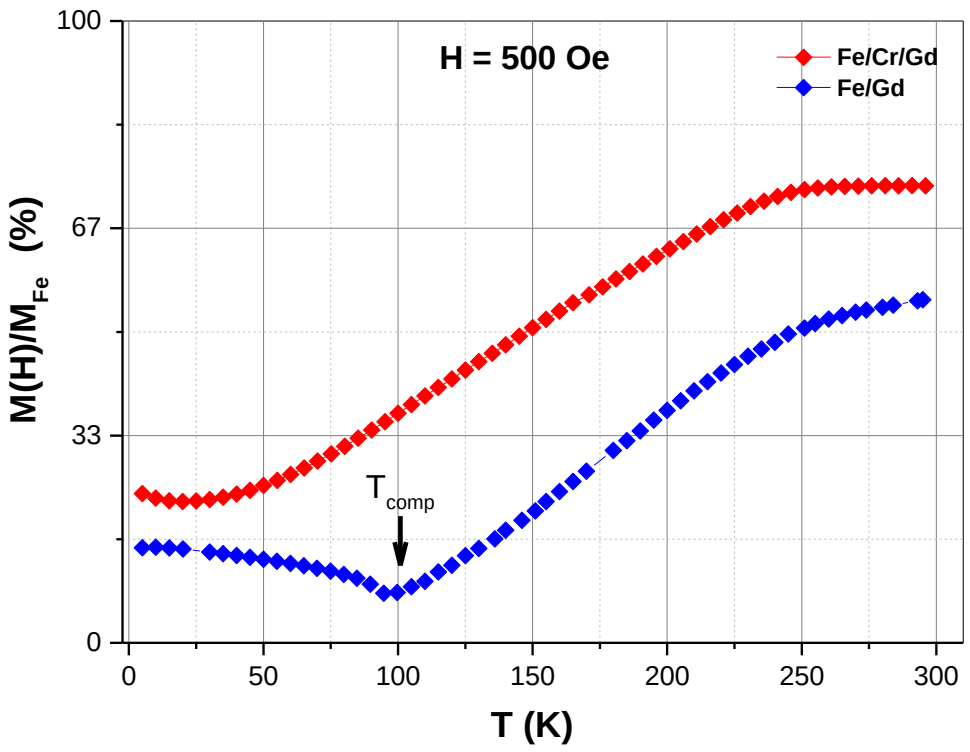
Grazing Incidence X-ray Diffraction





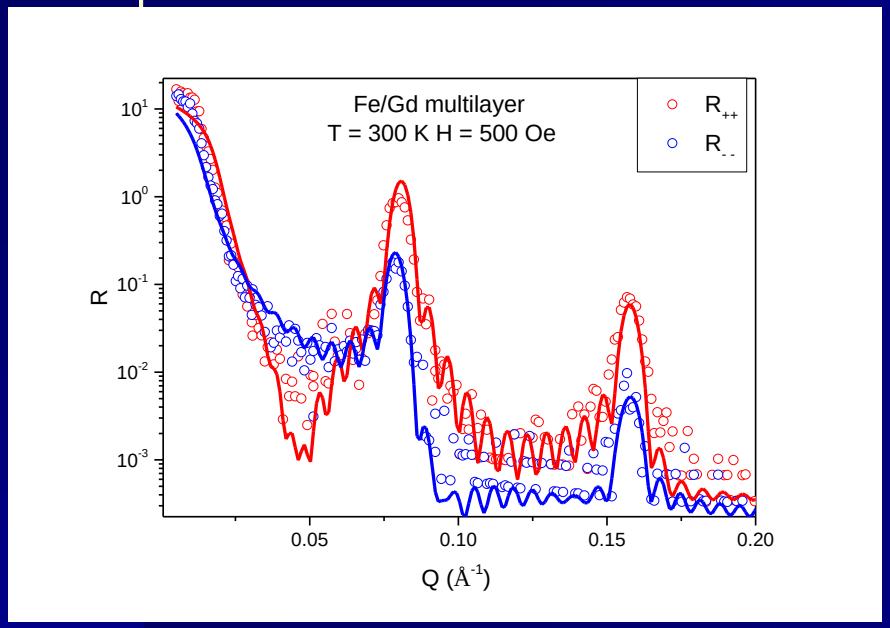
- Поликристаллические образцы
- Прослойка в Cr 3ML индуцирует формирование ГЦК фазы Gd

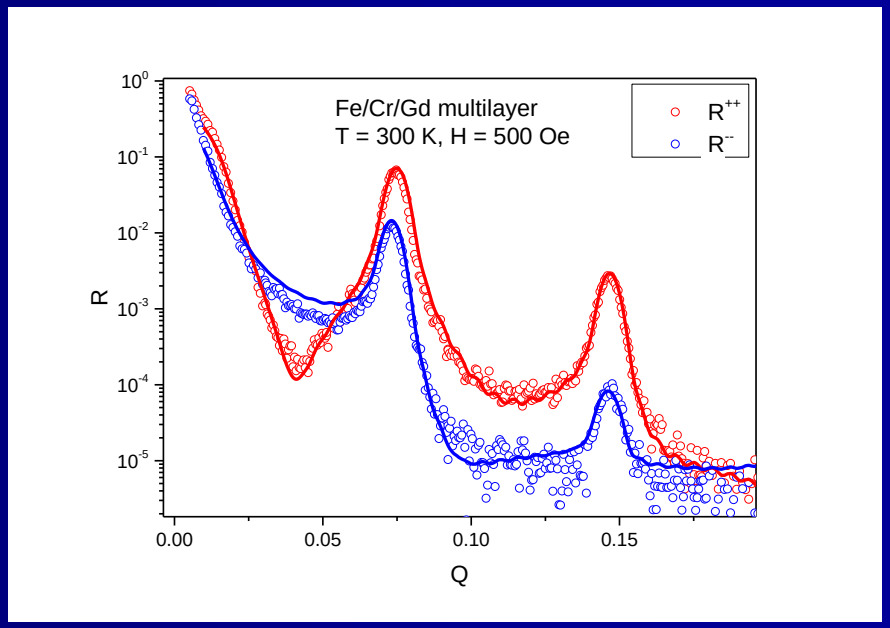
Магнитные свойства (SQUID)



В системе Fe/Cr/Gd исчезла точка компенсации

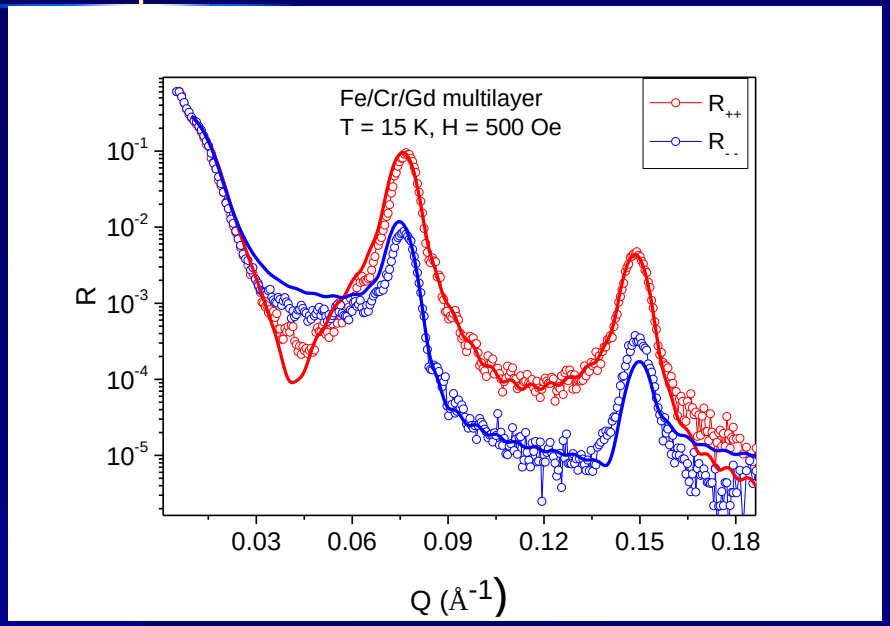
Поляризационная нейтронная рефлектометрия T=300 K

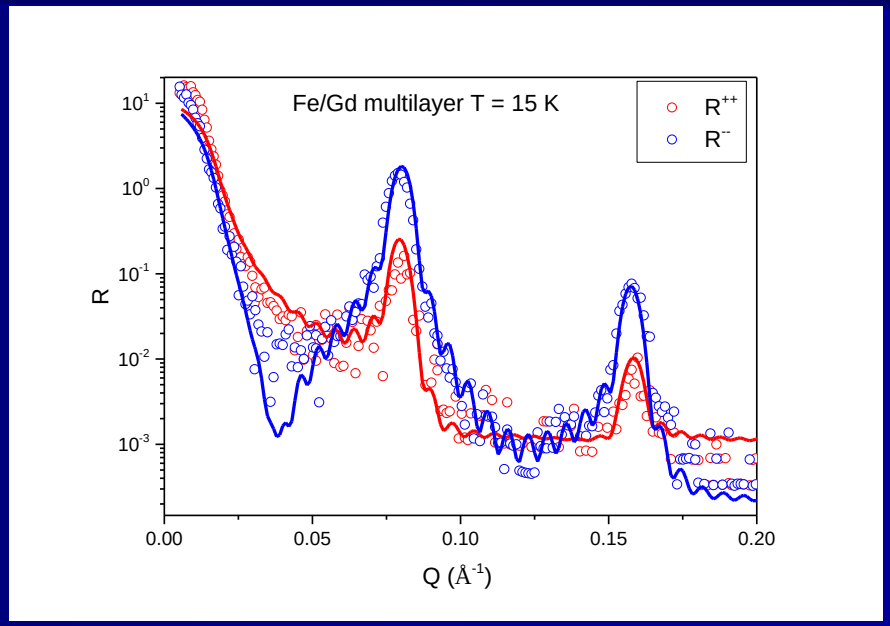




Магнитные структуры Fe/Gd и Fe/Cr/Gd во многом похожи

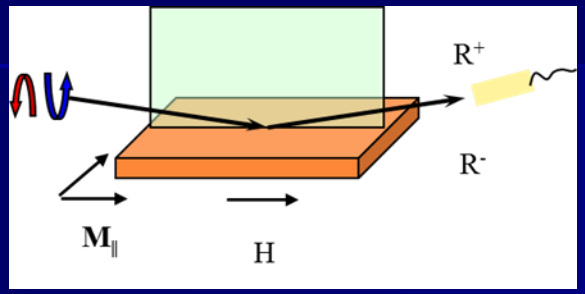
Поляризационная нейтронная рефлектометрия T=15 K



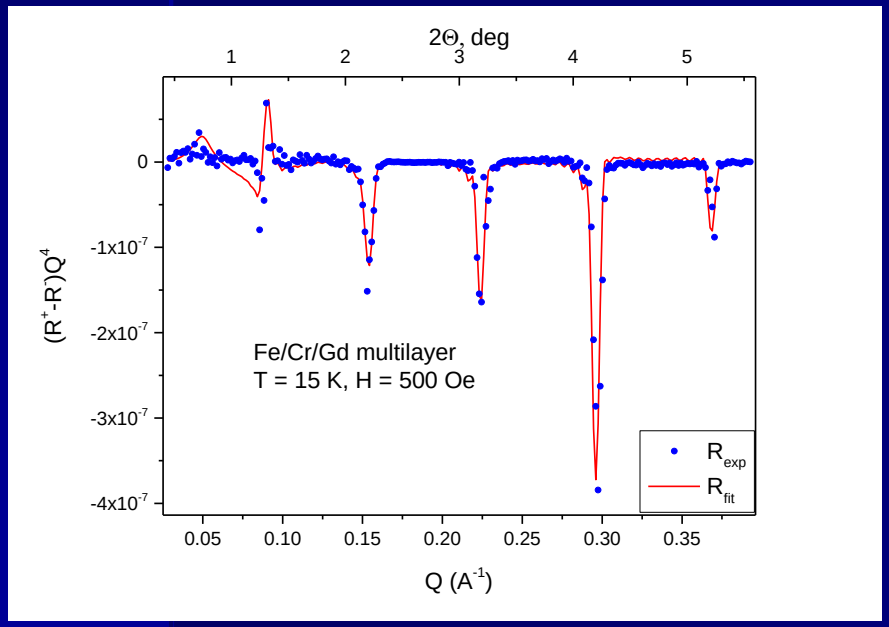


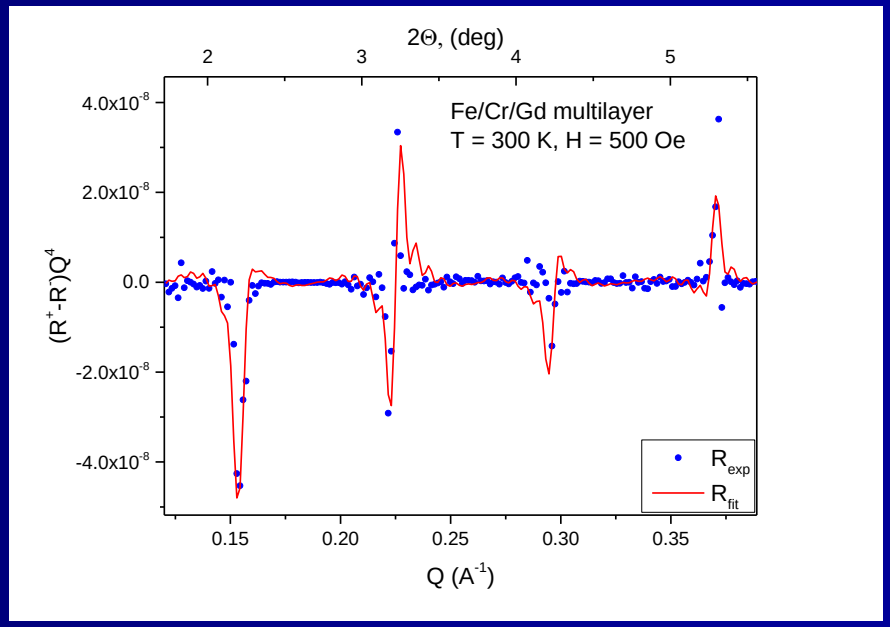
Магнитные структуры Fe/Gd и Fe/Cr/Gd кардинально отличаются

Резонансная рентгеновская магнитная рефлектометрия

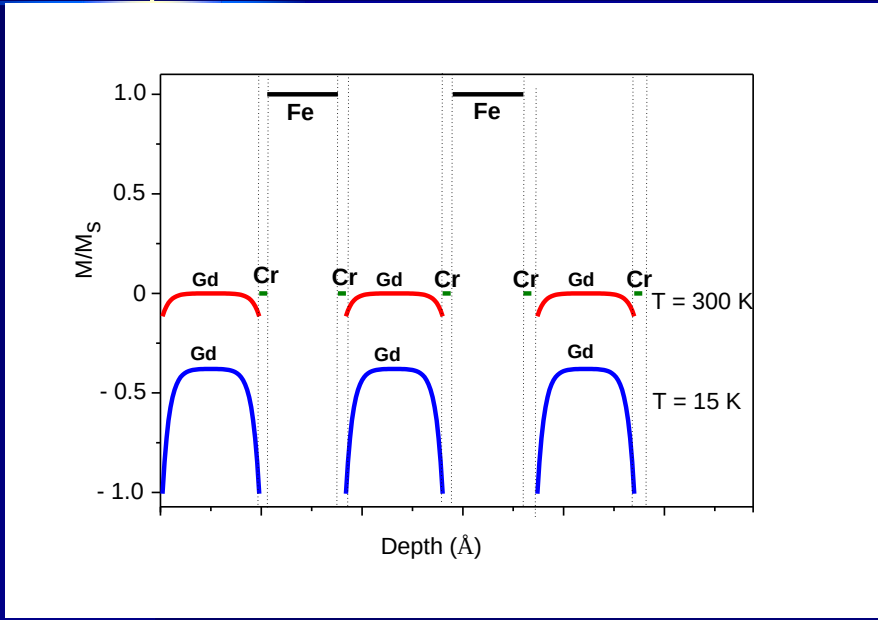


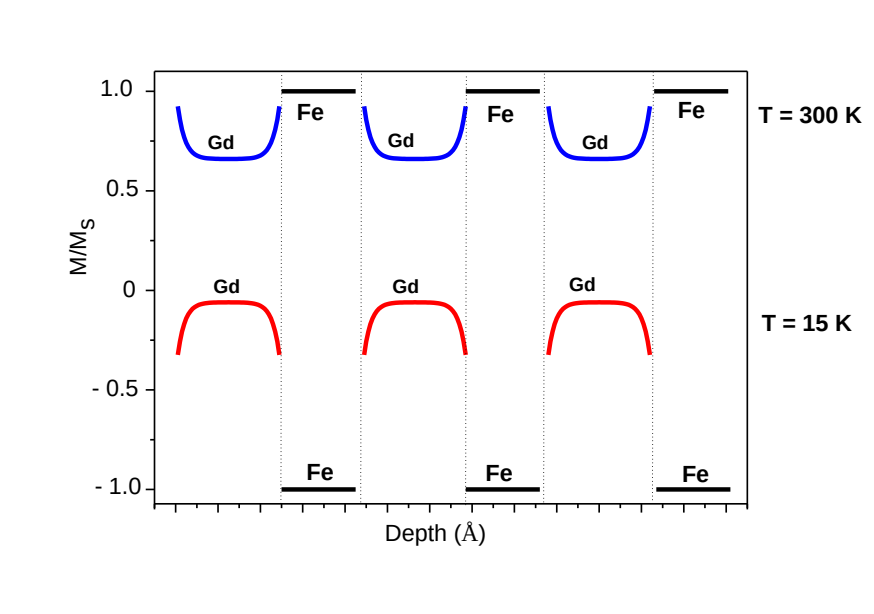
$$R_+ - R_- \propto M_{\parallel}$$





Распределение магнитных моментов в сверхрешетках





	T, K	m_{Gd}, μ_B			m_{Fe}, μ_B	α_{Gd}	α_{Fe}
Fe/Cr/Gd	15	7	4	7	2.2	180	0
	300	1	0	1	2.2	180	0
Fe/Gd	15	7	4	7	2.2	180	0
	300	3	0	3	2.2	0	180

Выводы

- Введение прослойки Cr приводит к формированию ГЦК фазы Gd
- Новая фаза характеризуется меньшей величиной магнитного момента
- Индуцированный момент в Gd имеет меньшую величину в Fe/Cr/Gd
- Система Fe/Cr/Gd может быть перспективной как материал с увеличенным магнитным моментом

Благодарности

М. Миляев, В. Проглядо, М. Рябухина, В.В. Устинов (ИФМ УрО РАН)

Ю. Никитенко (ЛНФ ОИЯИ)

D. Haskel (Argonne National Lab)

Ю. Хайдуков (Max Plank Institute, Stuttgart)

Благодарю за внимание