



# Эффекты близости в сверхрешетках Fe/Cr/Gd

Рябухина Марина

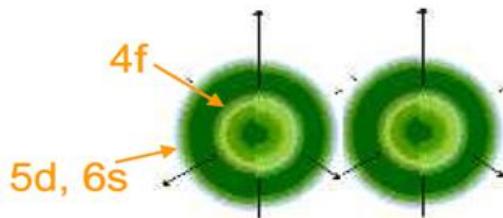
# Магнитные элементы

Объект исследования – серия сверхрешеток **Fe/Cr(t)/Gd**

## Принципиально различное поведение

- Редкоземельные металлы**

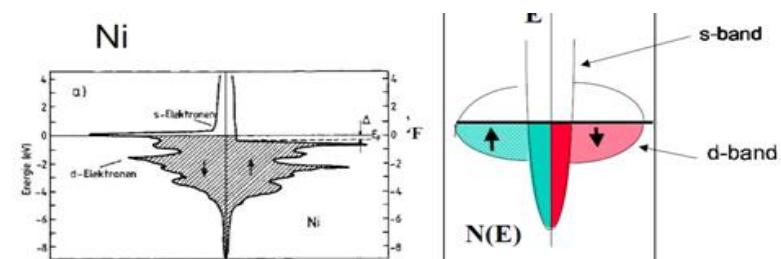
Обменное взаимодействие в РЗ



Магнитные 4f электроны локализованы.  
5d и 6s электроны коллективизированы.  
4f моменты связаны через косвенное  
обменное взаимодействие (РКИ)

- Переходные металлы**

Прямое обменное коллективизированное  
взаимодействие 3d – электронов



# Fe/Gd как модель ферримагнитной системы

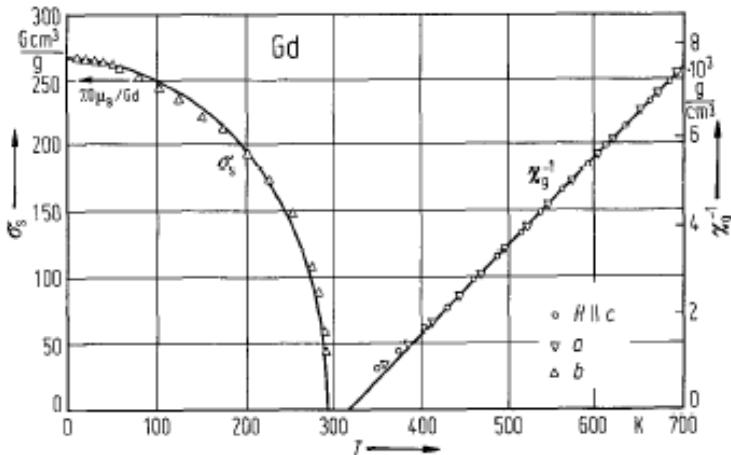
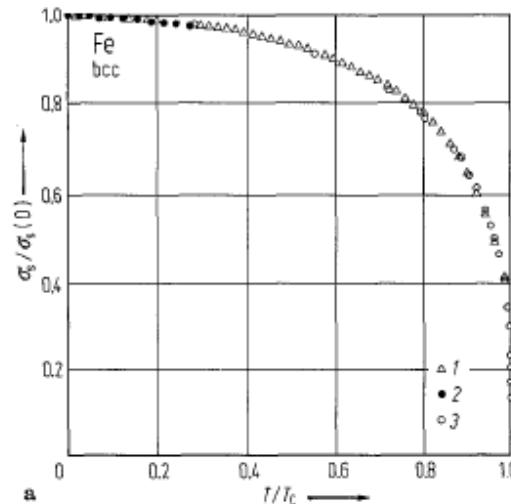


Fig. 144. Temperature dependence of the spontaneous magnetic moment and reciprocal magnetic susceptibility in Gd.  $T_c = 293$  K,  $\Theta = 317$  K. The solid curve is the  $S = 7/2$  Brillouin function. Departures from the Curie-Weiss susceptibility near  $\Theta$  result from short-range ordering [63 N1, 65 B1].

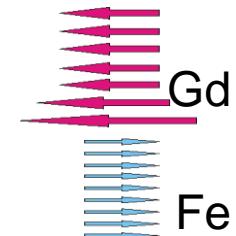


$$T_c (\text{bulk Fe}) = 1043 \text{ K}$$

$$T_c (\text{bulk Gd}) = 293 \text{ K}$$

- Сильная температурная зависимость магнитного момента Gd
- Сильная внутрислойное обменное взаимодействие Fe
- Сильное антиферромагнитное взаимодействие Fe – Gd
- Слабое внутрислойное обменное взаимодействие Gd

$$\begin{aligned} J_{\text{Gd-Gd}} &\sim 7.5 \text{ pJ/m} \\ J_{\text{Fe-Gd}} &\sim -10 \text{ pJ/m} \\ J_{\text{Fe-Fe}} &\sim 20.5 \text{ pJ/m} \end{aligned}$$

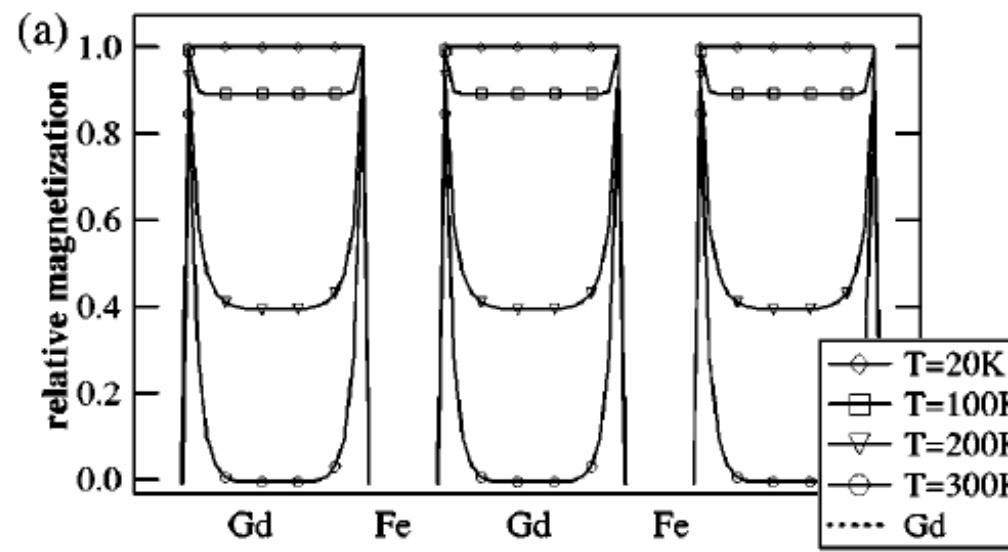


# Зависимость магнитных моментов от температуры в сверхрешетках Fe/Gd

PHYSICAL REVIEW B 70, 134420 (2004)

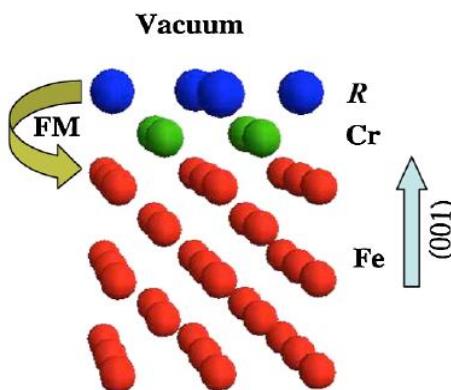
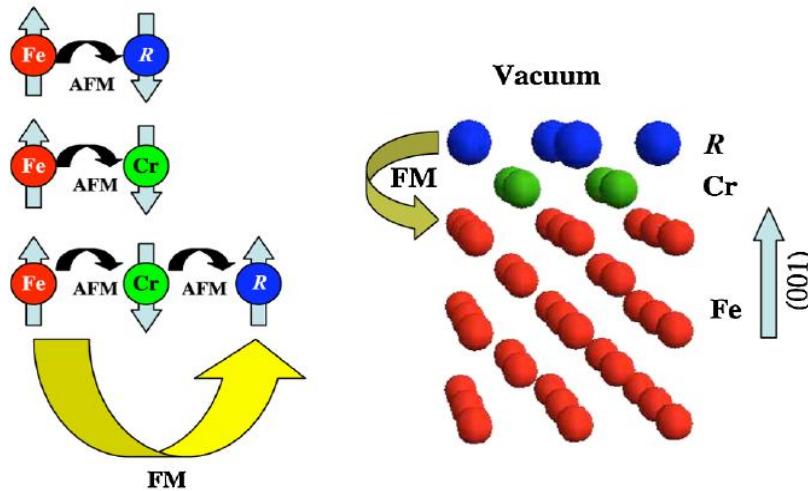
Temperature evolution of the Gd magnetization profile in strongly coupled Gd/Fe multilayers

Y. Choi,<sup>1,2</sup> D. Haskel,<sup>2</sup> R. E. Camley,<sup>3</sup> D. R. Lee,<sup>2</sup> J. C. Lang,<sup>2</sup> G. Srayer,<sup>2</sup> J. S. Jiang,<sup>4</sup> and S. D. Bader<sup>4</sup>



$T$ (K)	$M_{\text{int}}$	$M_{\text{mid}}$	$\sigma_{m,\text{GdFe}}$ ( $\text{\AA}$ )	$\sigma_{m,\text{GdGd}}$ ( $\text{\AA}$ )
300	$1.00 \pm 0.12$	$0.00 \pm 0.00$	$4.21 \pm 0.23$	$3.18 \pm 0.06$
200	$1.00 \pm 0.13$	$0.46 \pm 0.04$	$3.89 \pm 0.14$	$3.26 \pm 0.13$
100	$1.00 \pm 0.13$	$0.74 \pm 0.04$	$3.76 \pm 0.09$	$3.61 \pm 0.23$
20	$1.00 \pm 0.13$	$0.91 \pm 0.03$	$3.66 \pm 0.06$	$3.44 \pm 0.31$

# Ферромагнитный эффект близости

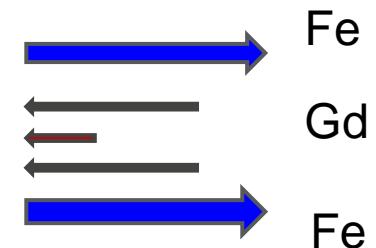


## Проблема:

Как будут влиять поверхности соседних ферромагнитных слоев на величину магнитного момента?

## Задачи:

- ▶ Исследовать магнитные свойства - определить взаимную ориентацию магнитных моментов отдельных слоёв и распределение намагниченности в отдельных слоях
- ▶ Определить элемент – чувствительные профили намагниченности в сверхрешетках Fe/Cr/Gd



# Рост наноструктур

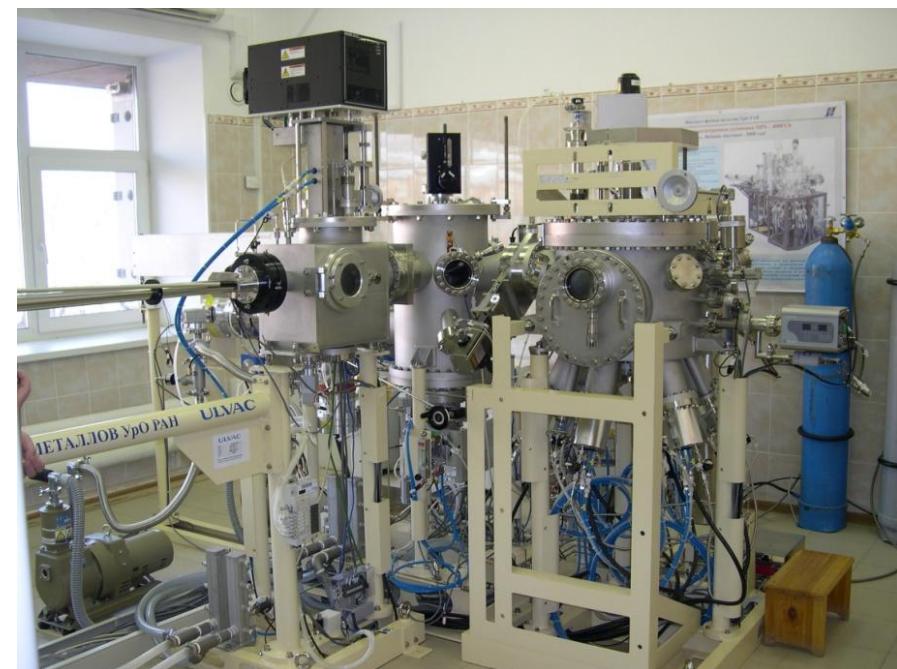
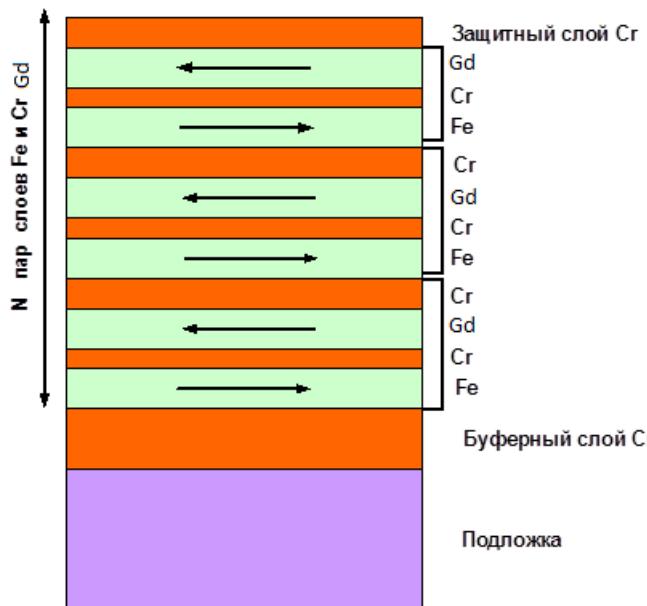
$\text{Si} // \text{Cr}(50\text{\AA})[\text{Fe}(35\text{ \AA})/\text{Cr}(t)/\text{Gd}(50\text{ \AA})/\text{Cr}(t)]_{12}\text{Cr}(30\text{\AA})$ ,  
где  $t=0-60\text{ \AA}$

Высоковакуумное магнетронное распыление MPS-4000-C6 (Ulvac):

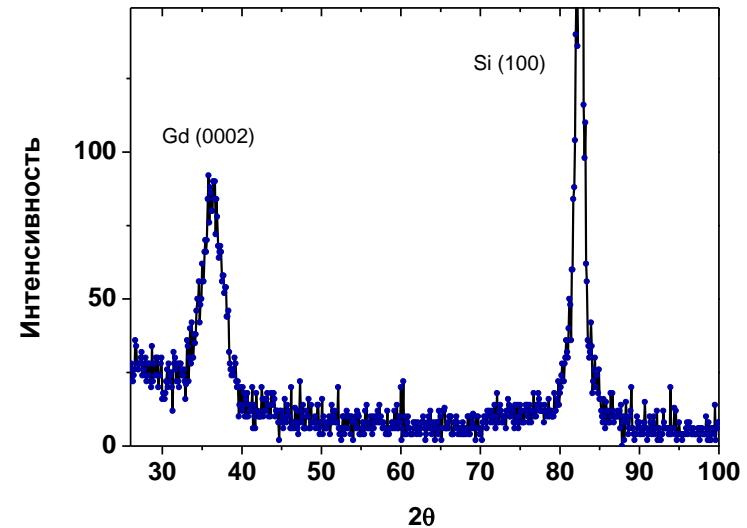
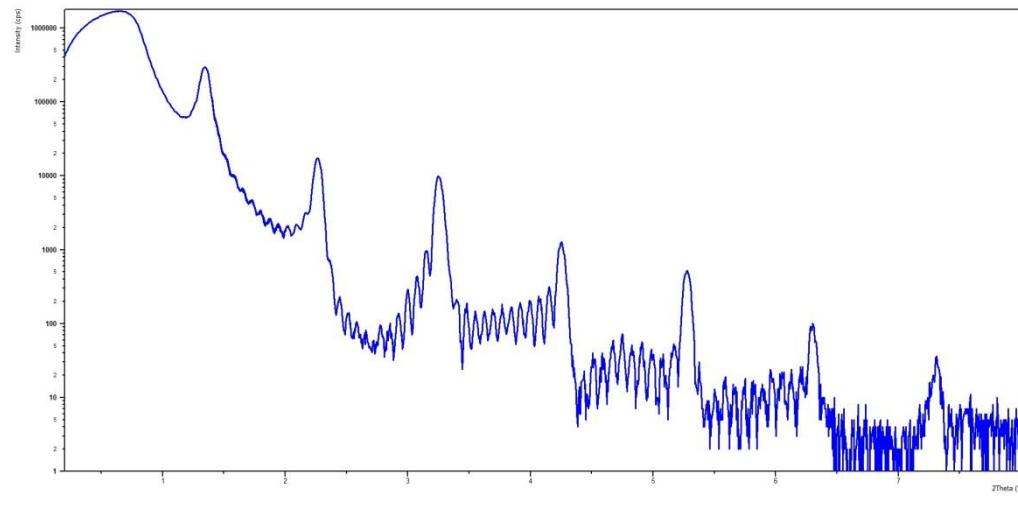
Базовое давление  $6 \cdot 10^{-7}$

Давление аргона в камере 0,1 Па

Температура подложки  $T=300\text{ K}$



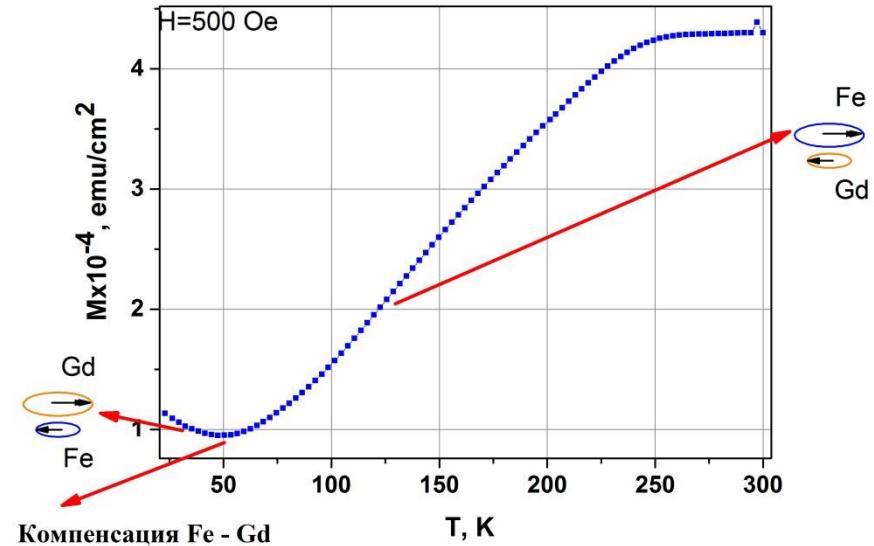
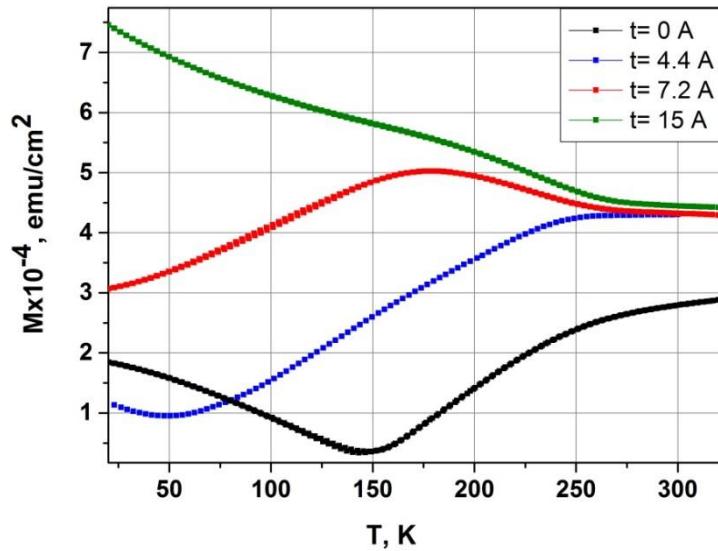
# Структурная аттестация образцов



Рентгеновские спектры сверхрешеток Fe/Cr(4.4 Å)/Gd

- образец имеет хорошо определенную слоистую структуру;
- периодичность слоистой структуры строго выдерживается;
- резкие межслойные границы;
- среднеквадратичная шероховатость границ Cr/Fe >Fe/Cr;
- ГПУ структура внутри слоя Gd

# Магнитная аттестация образцов

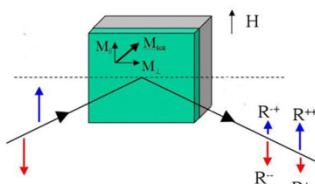


$$T_c^{gd} = 252 \text{ K} \quad T_c^{gd\text{-bulk}} > T_c^{gd}$$

Аномалия магнитных свойств  
Существенная зависимость от  $t_{Cr}$

# Плюсы и минусы методик

- ПНР



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

$$R_{+-} = R_{-+} \propto M_{\perp}^2$$

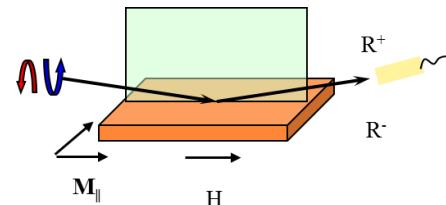
- Прямое взаимодействие с магнитными моментами
- Послойная векторная магнитометрия
- Самокалибрующийся метод



- Низкое пространственное разрешение ввиду низких интенсивностей
- Нет элементной чувствительности
- Неединственность решения для сложных магнитных систем



- РРМР



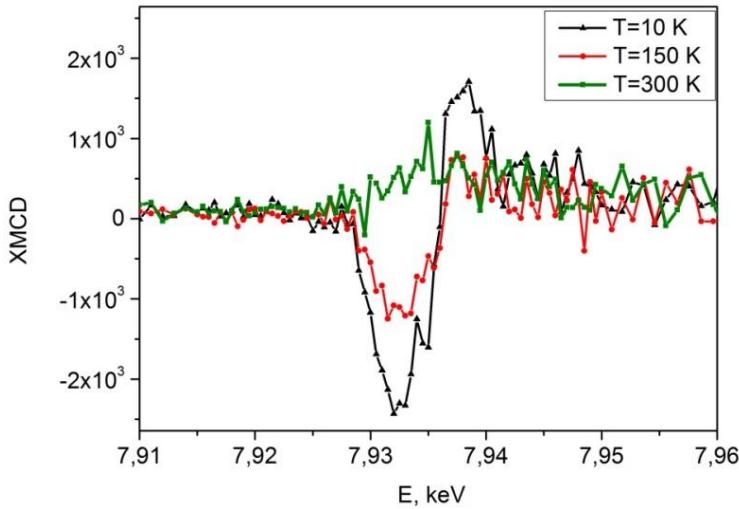
- Высокое пространственное разрешение ввиду высоких интенсивностей
- Элементная чувствительность

- Косвенное взаимодействие с магнитными моментами
- Определяется только одна компонента намагниченности
- Неединственность решения для сложных магнитных систем

## Экспериментальные методы

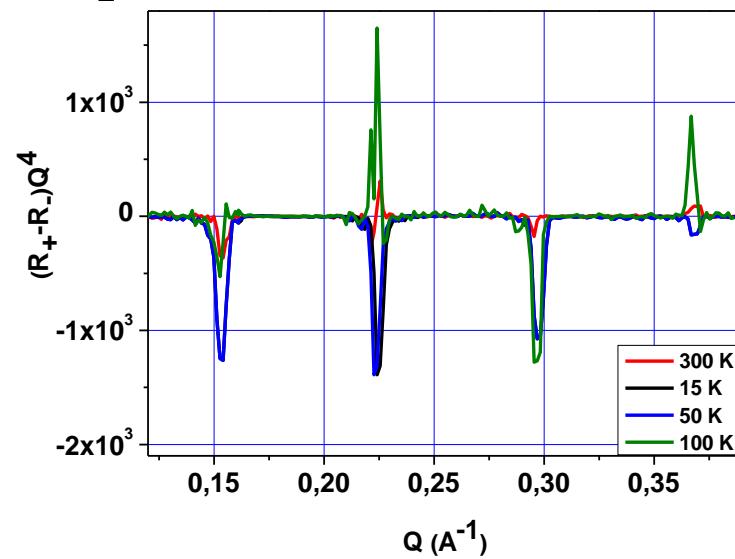
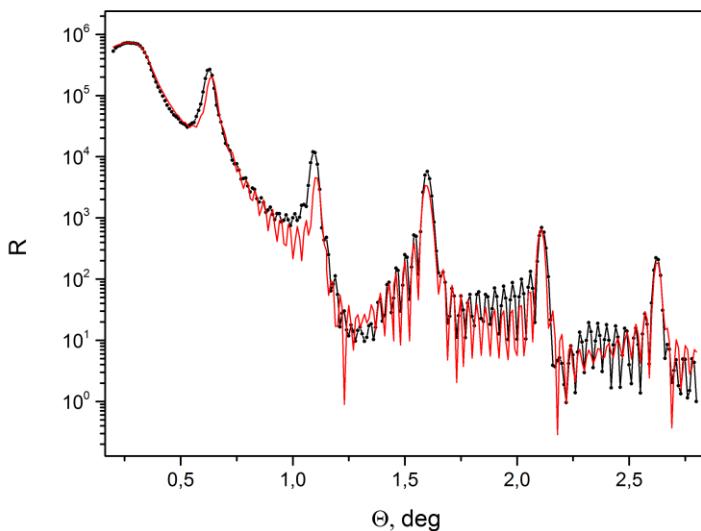
- Поляризационная нейтронная рефлектометрия (ПНР):  
**REMUR** (ОИЯИ), **NREX** (FRM II)
- Резонансная рентгеновская магнитная рефлектометрия (PPMR):  
**4 – ID –D** (APS)

# XMCD и РРМР спектры сверхрешетки Fe/Cr(4.4 Å)/Gd

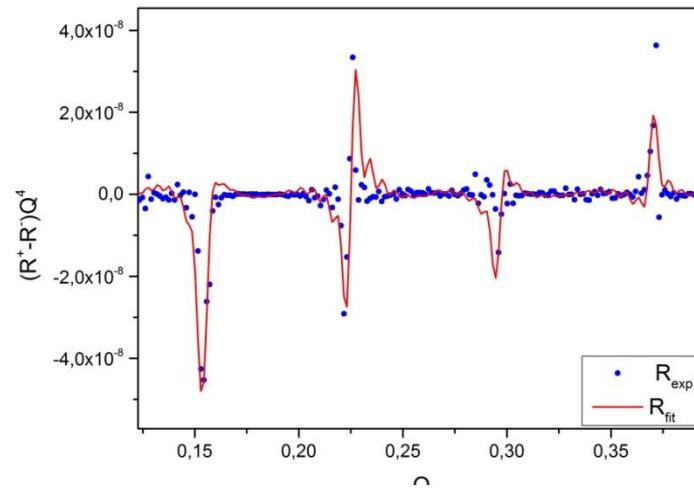
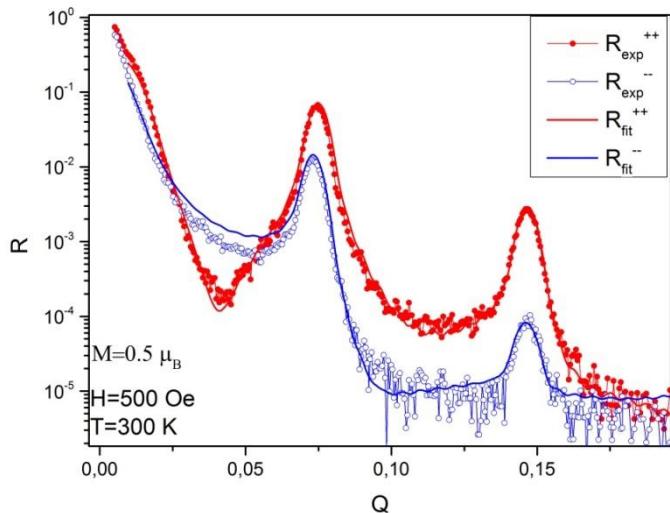


- Сильная температурная зависимость
- По мере уменьшения температуры магнитный момент Gd увеличивается, а при 300 К происходит переориентация его магнитного момента.
- При низких температурах момент Gd направлен по полю, при 300 К - против поля.

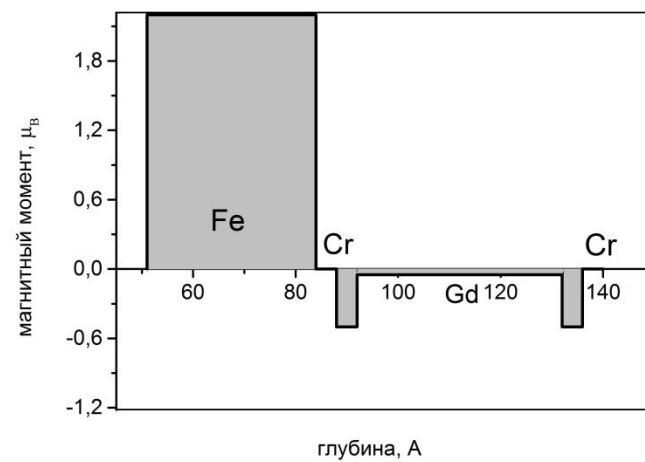
Измерения на L<sub>2</sub>-крае Gd



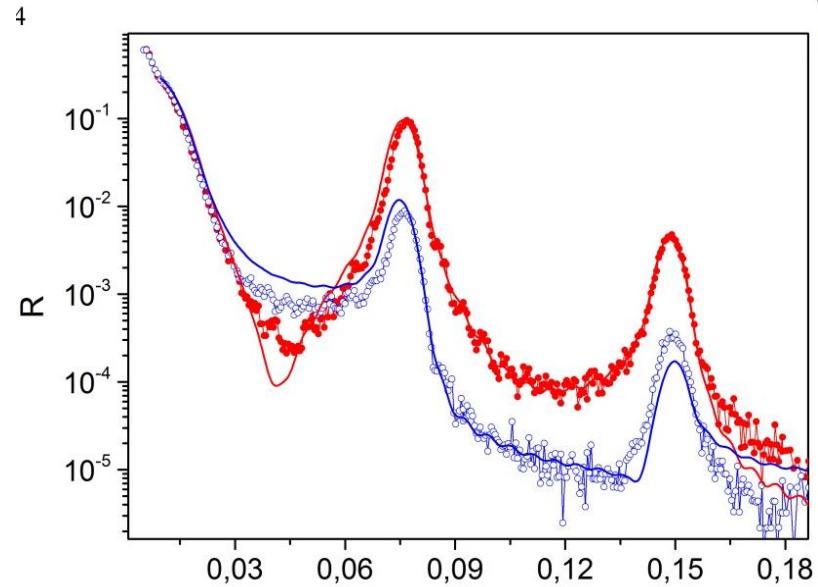
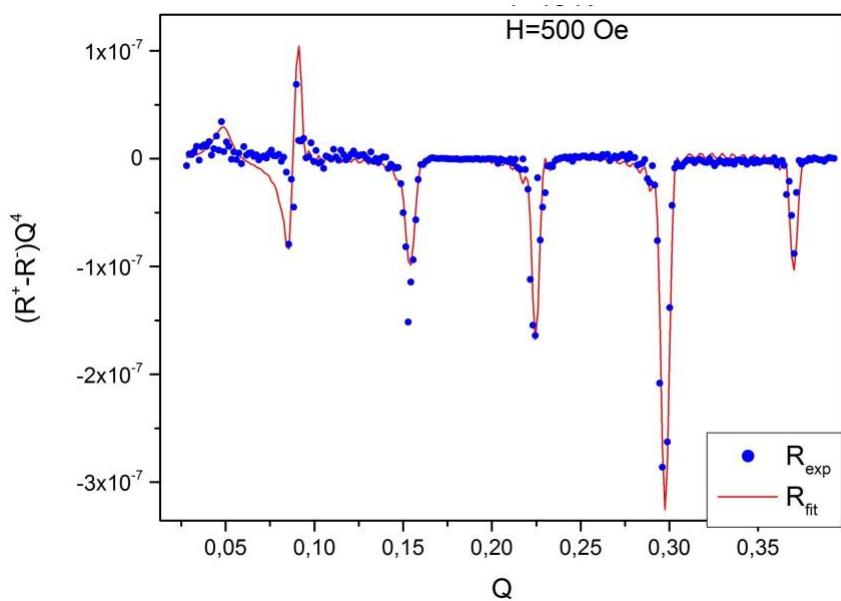
# ПНР и РРМР спектры сверхрешеток Fe/Cr(4.4 Å)/Gd, при T=300 K, H=500 Ое



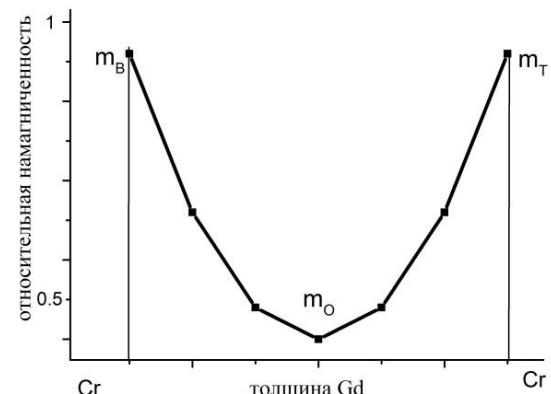
слой	$\sigma, \text{ \AA}$	$m_B, \mu_B$	$m_T, \mu_B$	$m_O, \mu_B$	$\tau, \text{ \AA}$	$\theta, \text{ град.}$
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	3					
Cr	2					
Cr	2	0	0	0	1	0
Gd	2	0.5	0.5	0	4	180
Cr	2	0	0	0	1	0
Fe	5	2.2	2.2	2.2	1	0
Cr	4					



## ПНР и РРМР спектры Fe/Cr(4.4 Å)/Gd, при T=15 K и H=500 Oe



слой	$m_B, \mu_B$	$m_T, \mu_B$	$m_O, \mu_B$	$\tau, \text{Å}$	$\theta, \text{град.}$
$\text{Cr}_2\text{O}_3$					
Cr					
Cr	0	0	0	1	0
Gd	7	7	4	4	0
Cr	0	0	0	1	0
Fe	2.2	2.2	2.2	1	180



T (K)	$M_{Gd}(\text{PNR/RXMR})$ , $10^{-4}$ emu/cm <sup>2</sup>	$M_{Fe}(\text{PNR/RXMR})$ , $10^{-4}$ emu/cm <sup>2</sup>	$M(\text{PNR/RXMR})$ , $10^{-4}$ emu/cm <sup>2</sup>	$M(\text{SQUID})$ , $10^{-4}$ emu/cm <sup>2</sup>
15 K	5.24	5.86	0.62	1.13
300 K	0.26	5.17	4.91	4.5

## Выводы:

- Согласно рентгеновским данным, образцы имеют хорошо определенную слоистую структуру
- Найдены величины магнитных моментов Gd
- Обнаружен эффект близости в слое Gd – на краях слоя образуется индуцированный момент
- Значительное уменьшение магнитного момента при низких температурах

## Благодарности

- Кравцов Е.А., Наумова Л.И., Проглядо В. В., Устинов В.В.  
(ИФМ)
- Никитенко Ю.В., (REMUR, ОИЯИ)
- Хайдуков Ю.Н. (NREX, FRM II)
- Хаскель Д. (4-ID-D, APS)

# Спасибо за внимание

