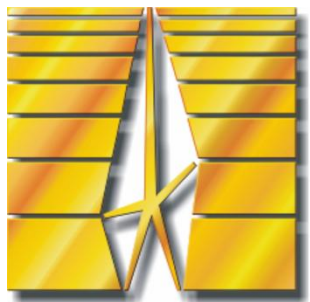




Физико-
Технический
Институт
им. А.Ф.Иоффе

отделение Физики твердого тела
лаб. Спектроскопии твердого тела
Группа эпитаксиальных диэлектриков
Н.С.Соколова

Исследование эффектов магнитной близости в гетероструктурах ферромагнетик/антиферромагнетик методами рентгеновской резонансной рефлектометрии и спектроскопии поглощения

*Федоров Владимир Викторович, , С. М. Сутурин, А. Г. Банщиков, Д. А. Баранов,
С. В. Гастев, К. В. Кошмак, Н. С. Соколов*

vfedorov@fl.ioffe.ru



Синхротон Elettra, Триест,
Италия



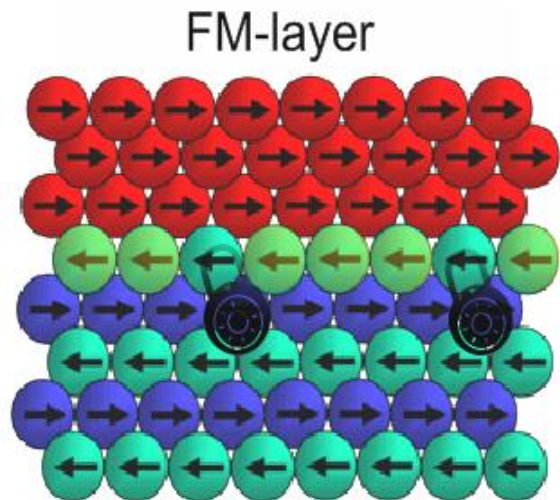
Синхротон Photon Factory,
Цукуба, Япония



Синхротон SPring8, преф. Хёго,
Япония

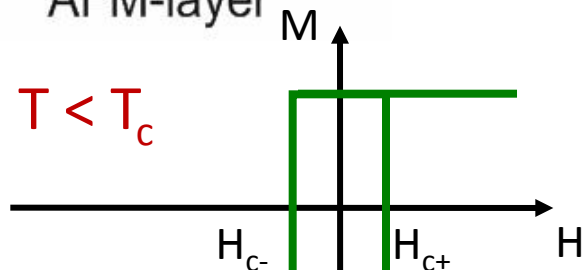


Обменное смещение петли гистерезиса в гетероструктурах ферромагнетик/антиферромагнетик (ФМ/АФМ)

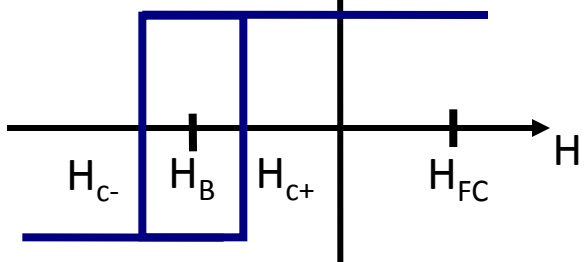


AFM-layer

$T_{\text{Нееля}} < T < T_c$



$T < T_{\text{Нееля}}$

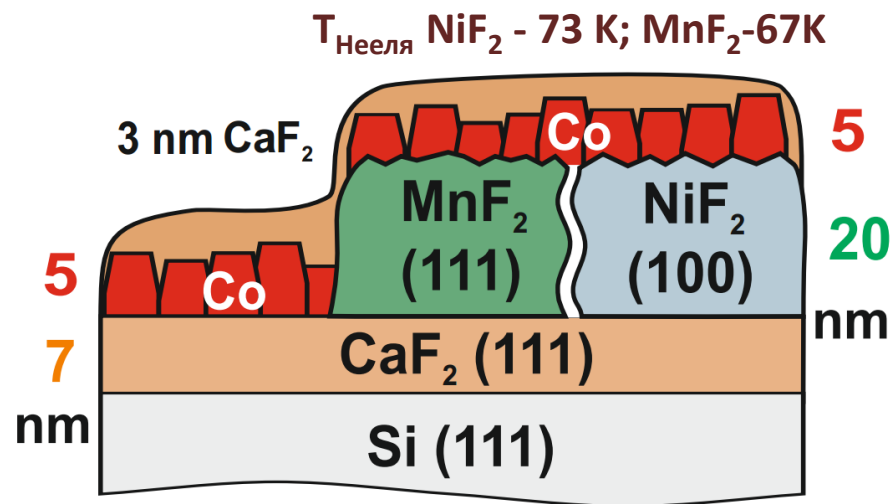


• *W.H. Meiklejohn and C.P. Bean 1956, Co/CoO*

- Наблюдается при охлаждении систем ФМ/АФМ ниже $T_{\text{Нееля}}$ в приложенном магнитном поле
 - Эффект вызван междоуровневым обменным взаимодействием на интерфейсе ФМ-АФМ (из-за наличия “зафиксированных” магнитных моментов на поверхности АФМ)
1. Увеличение температуры блокировки наночастиц (доп. обменная анизотропия)
 2. “Фиксированные” магнитные слои в спиновых клапанах (GMC, TMC) – MRAM etc.
 3. “Магнитомягкий” подслой (SUL) в HDD с перпендикулярной анизотропией

Гетероструктуры ферромагнетик/антиферромагнетик (МЛЭ)

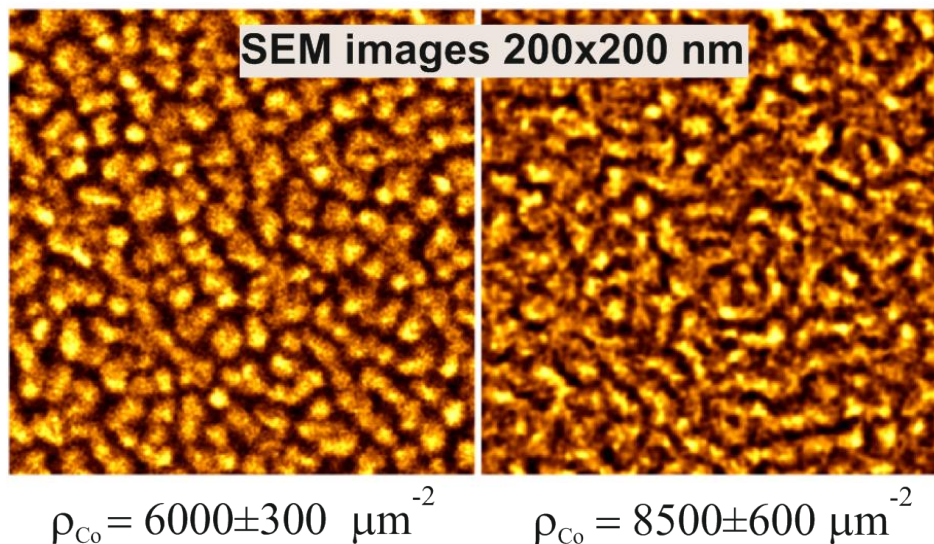
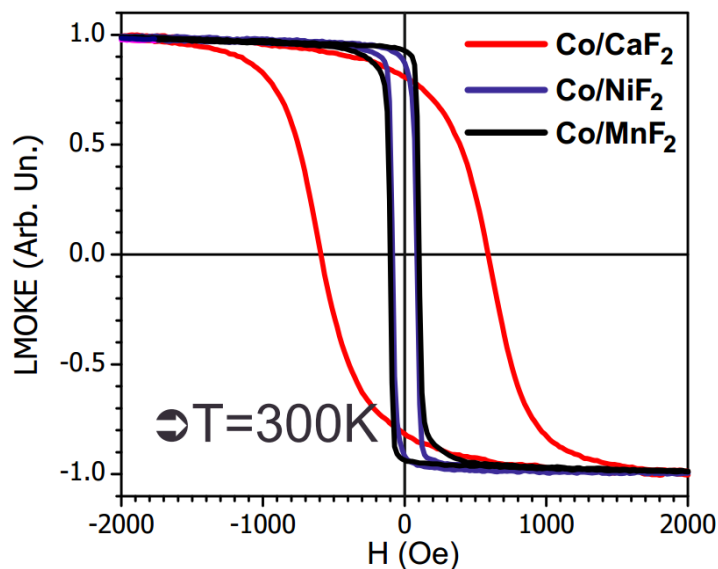
- Массивы ФМ частиц, выращенные на поверхности MnF_2 или NiF_2 обладают существенно (до 8 раз) меньшей коэрцитивностью, в сравнении со структурами типа ФМ/ CaF_2
- Эффект наблюдается даже в случае псевдоморфного слоя MnF_2 (3 ML) / CaF_2 и отсутствует при наличии тонкой прослойки CaF_2 (2-3ML)



- 5 nm Co нанесенных при 300K

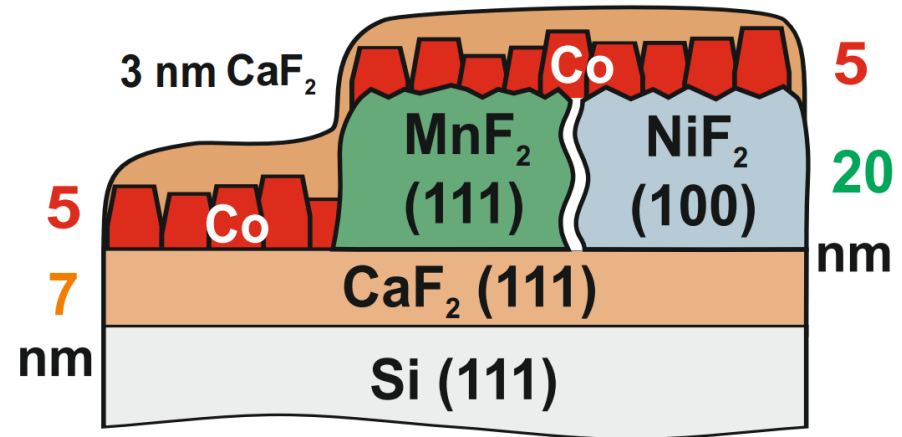
Co / CaF_2

Co / MnF_2

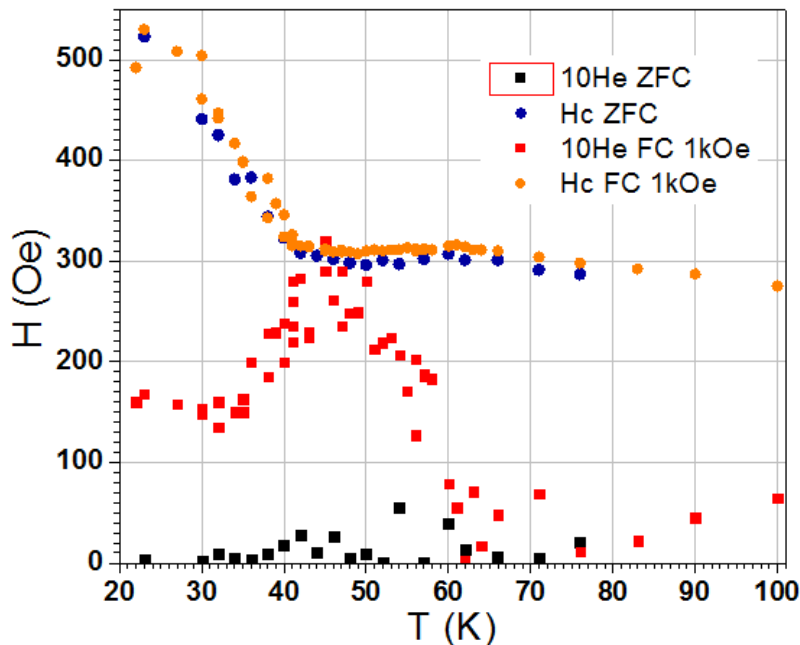


Гетероструктуры ферромагнетик/антиферромагнетик

- ❖ Петля смещается в сторону противоположную полю заморозки (отрицательное обменное смещение)
- ❖ Эффект обменного смещения петли магнитного гистерезиса наблюдался после охлаждения гетероструктур ниже $T_{\text{Neel}}(\text{MnF}_2) = 67.2\text{K}$ в поле $H_{\text{fc}} = 1\text{ kOe}$ и достигает максимума при $T \sim 40\text{-}50\text{K}$
- ❖ При охлаждении ниже $T_{\text{Нееля}}$ на зависимости коэрцитивного поля от температуры наблюдается излом

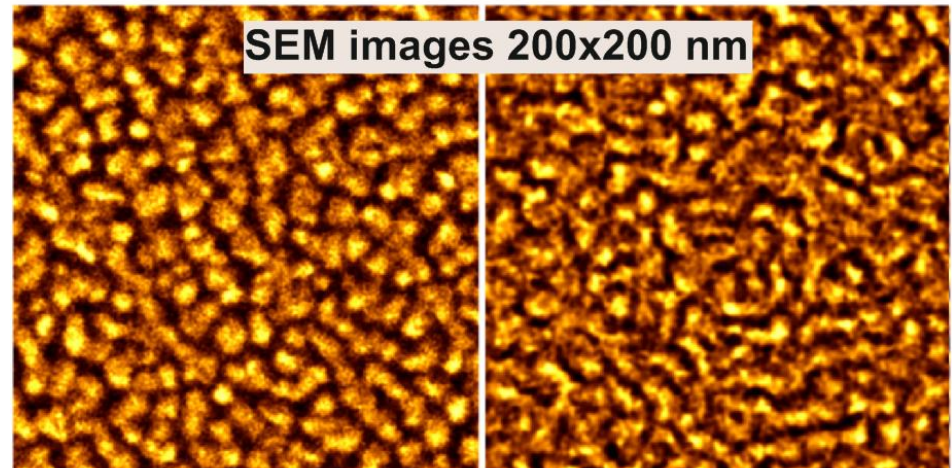


- 5 nm Co нанесенных при 300K



Co / CaF₂

Co / MnF₂



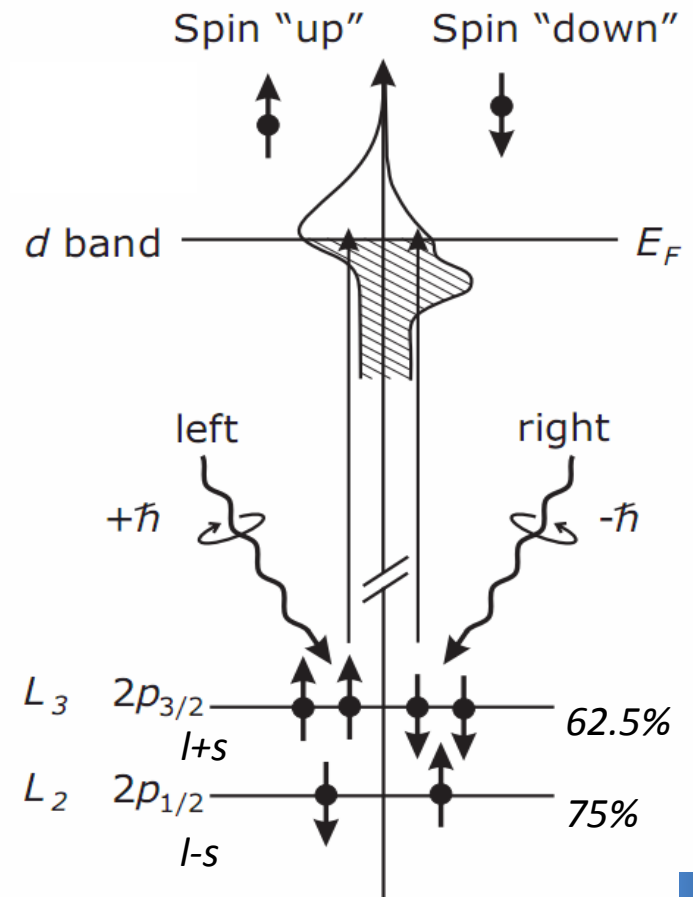
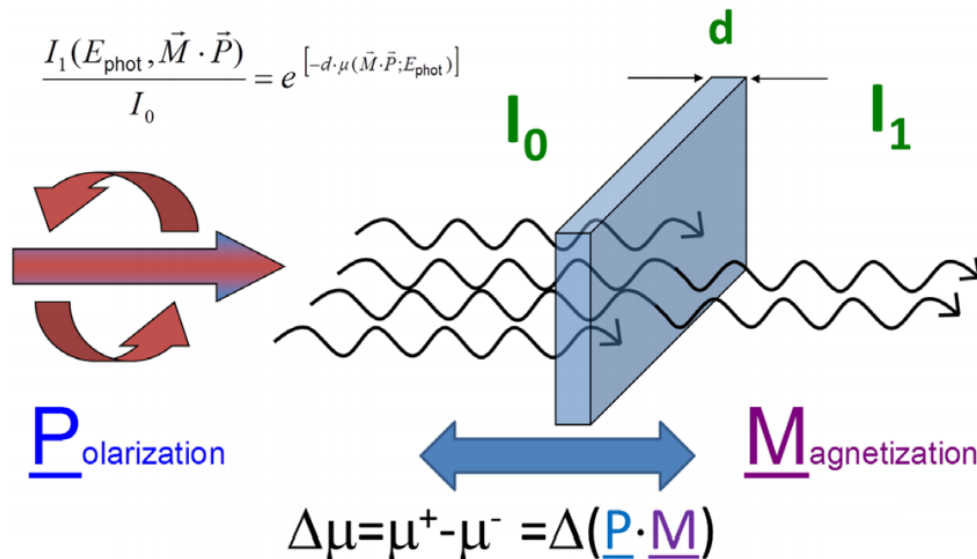
$$\rho_{\text{Co}} = 6000 \pm 300 \text{ } \mu\text{m}^{-2}$$

$$\rho_{\text{Co}} = 8500 \pm 600 \text{ } \mu\text{m}^{-2}$$

Рентгеновский магнитно циркулярный дихроизм

X-ray magnetic circular dichroism (XMCD)

- ❖ “Переходы с подуровней расщепленных вследствие спин-орбитального взаимодействия на уровни расщепленные обменным взаимодействием”
- ❖ Например: L-край поглощения ($2p^6 3d^n \rightarrow 2p^5 3d^{n+1}$) (для переходных 3d-элементов и их соединений)
применимо так же и к (3d;4d;4f,5d)
- ❖ Циркулярно-поляризованное излучение возбуждает электроны с преимущественной ориентацией спина



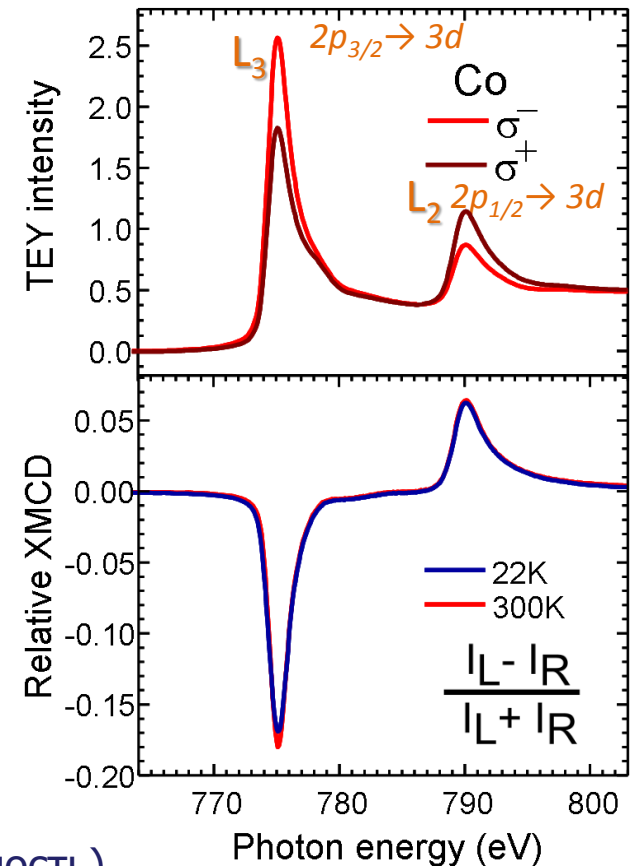
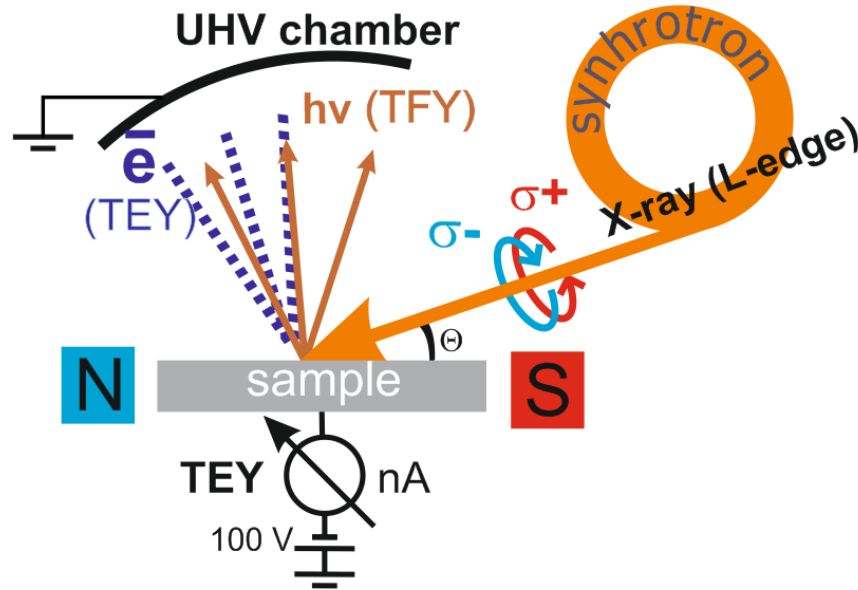
- Дихроизм ($\Delta\mu$) ~ макроскопической намагниченности обусловленной конкретным химическим элементом

Рентгеновский магнитно циркулярный дихроизм

X-ray magnetic circular dichroism (XMCD)

- ❖ “Переходы с подуровней расщепленных вследствие спин-орбитального взаимодействия на уровни расщепленные обменным взаимодействием”
- ❖ Например: L-край поглощения ($2p^6 3d^n \rightarrow 2p^5 3d^{n+1}$) (для переходных 3d-элементов и их соединений)
применимо так же и к (3d;4d;4f,5d)
- ❖ Циркулярно-поляризованное излучение возбуждает электроны с преимущественной ориентацией спина

- Элементно-селективные кривые намагничивания
- Можно измерить m_l и m_s



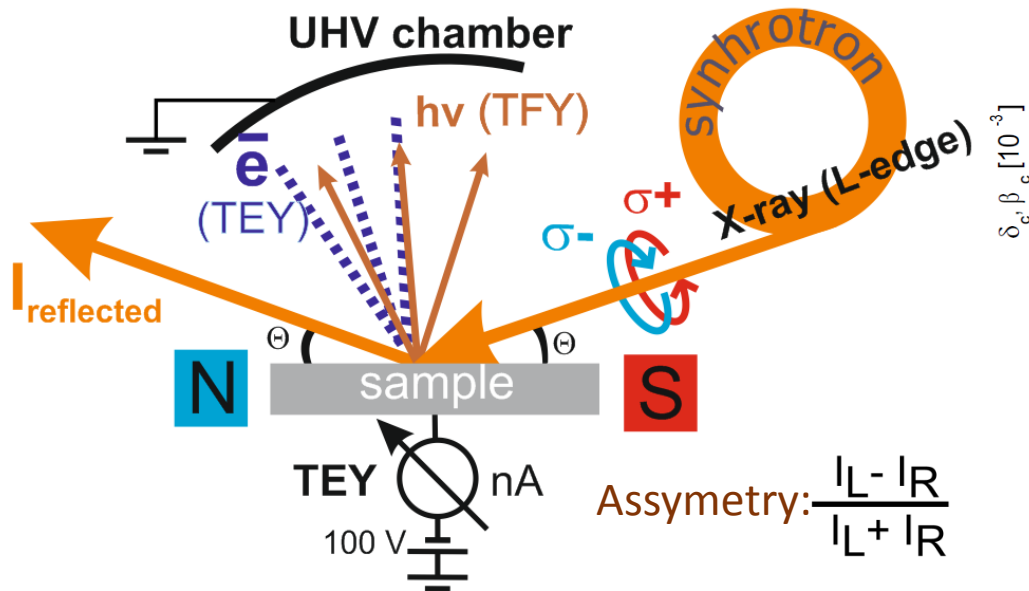
- TEY (Total Electron Yield) – ток фотоэлектронов (поверхность)
- TFY (Total Fluorescence Yield) – флюоресценция (объем)

Рентгеновская резонансная магнитная рефлектометрия

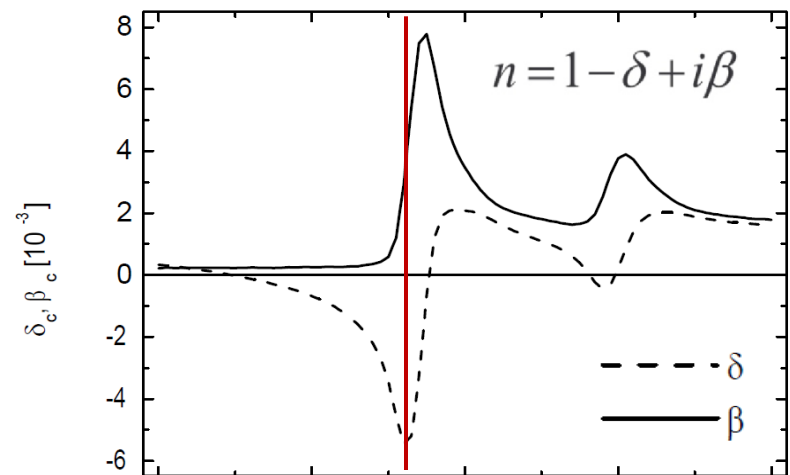
X-ray resonant magnetic reflectivity (XRMR)

- ❖ “Переходы с подуровней расщепленных вследствие спин-орбитального взаимодействия на уровни расщепленные обменным взаимодействием”
- ❖ Например: L-край поглощения ($2p^6 3d^n \rightarrow 2p^5 3d^{n+1}$) (для переходных 3d-элементов и их соединений)
применимо так же и к (3d;4d;4f,5d)
- ❖ Циркулярно-поляризованное излучение возбуждает электроны с преимущественной ориентацией спина

- Моделируя кривые асимметрии отражения можно определить элементно-селективный профиль намагниченности по глубине



Поведение оптических констант Co
вблизи L-края поглощения



beta – поглощение (спектр поглощения XAS)

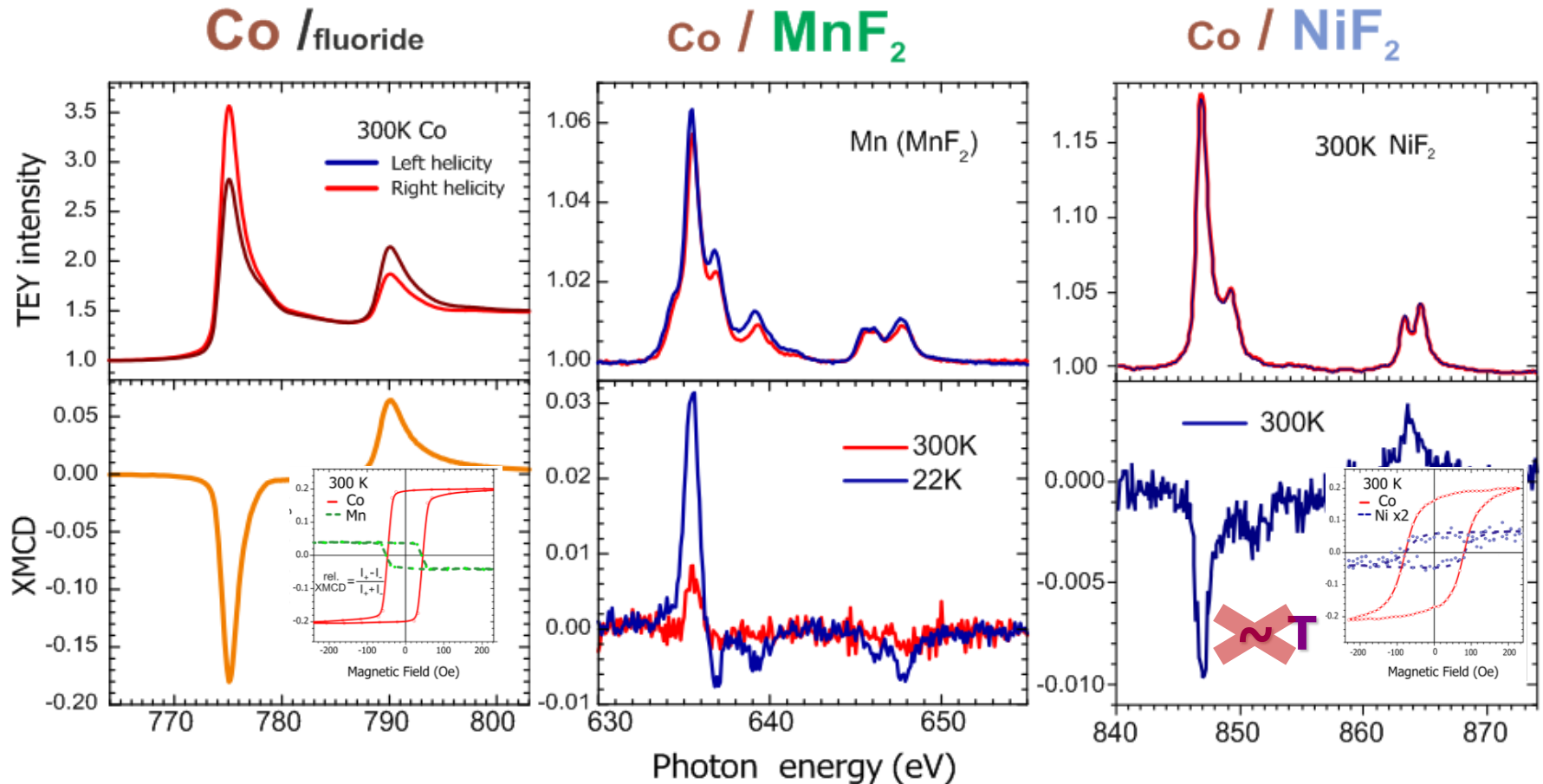
delta – определяет “контрастность” границы раздела, связана с beta через преобразования Крамерса-Кронига

Точка перегиба

Co - 786.6eV – максимум δ , но β мало

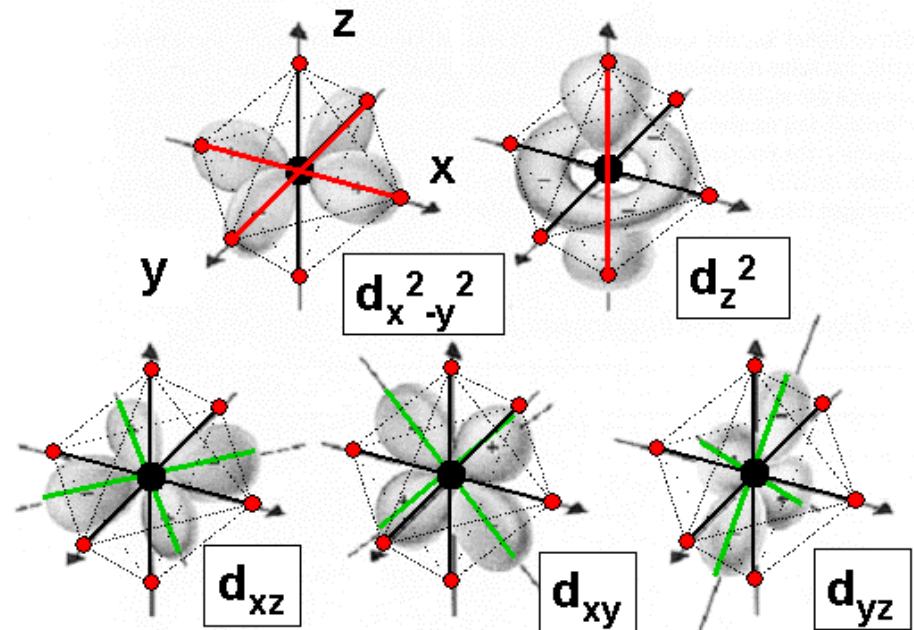
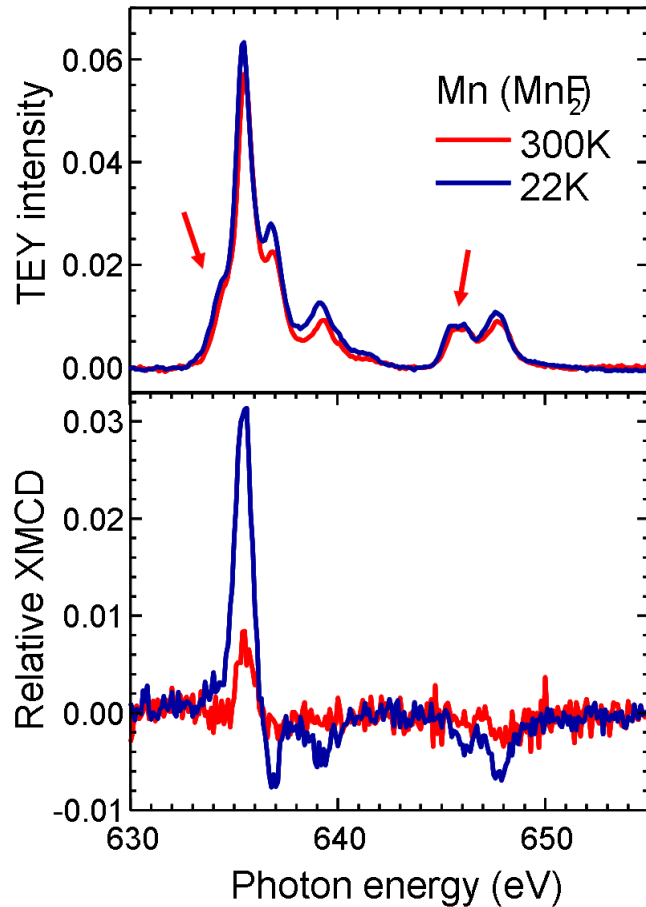
- Photon in - photon out – нет аппаратного влияния магнитного поля
- Подходит для “замурованных” интерфейсов

Результаты XAS/XMCD

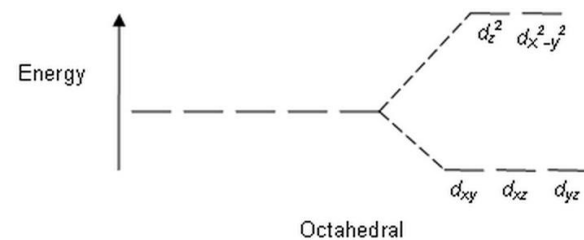


- ❖ “Эффект близости (ФМ/ПМ)”: магнитные моменты ионов **Mn²⁺**, находящиеся на интерфейсе с **Co**, выстраиваются **антипараллельно** магнитным моментам ферромагнетика
- ❖ **T (300K) >> T_{Neel}(MnF₂) (67.2K)**; с уменьшением температуры (до 22K) доля связанных моментов растет
- ❖ **??? Наведенная намагниченность в NiF₂ сонаправлена с намагниченности слоя кобальта ???**
- ❖ Упорядоченные эффектом близости магнитные моменты MnF₂ (NiF₂) перемагничиваются вместе со слоем ФМ

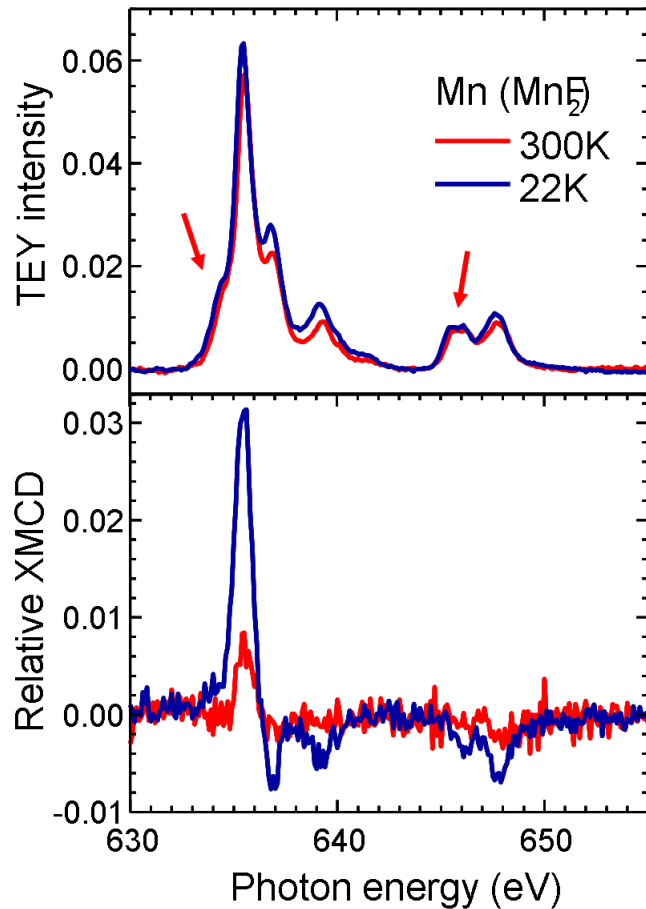
Структура L-края поглощения MnF_2



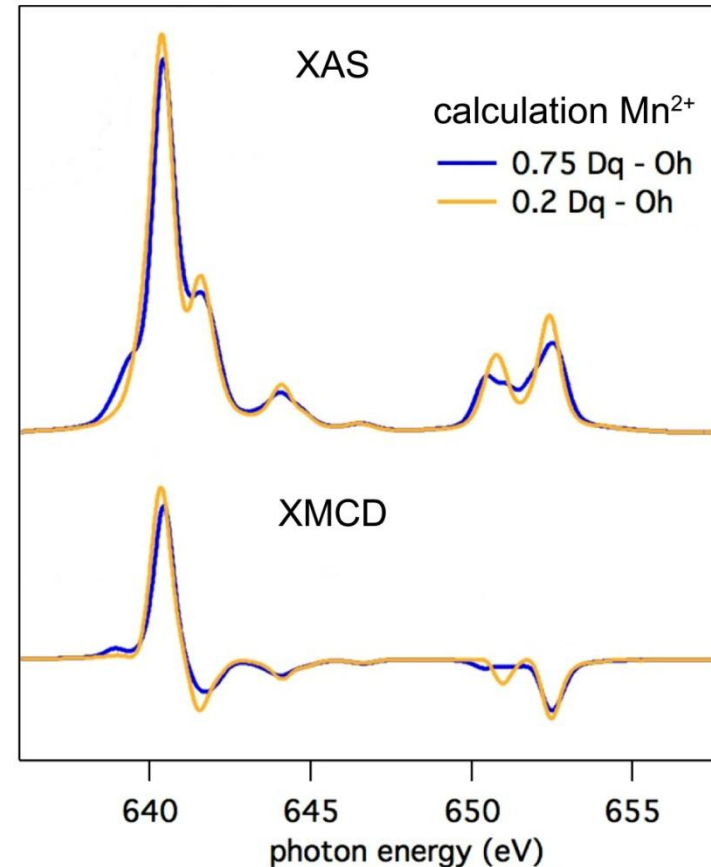
Ион Mn^{2+} в **октаэдрическом** окружении
лигандов **F**



Структура L-края поглощения MnF_2



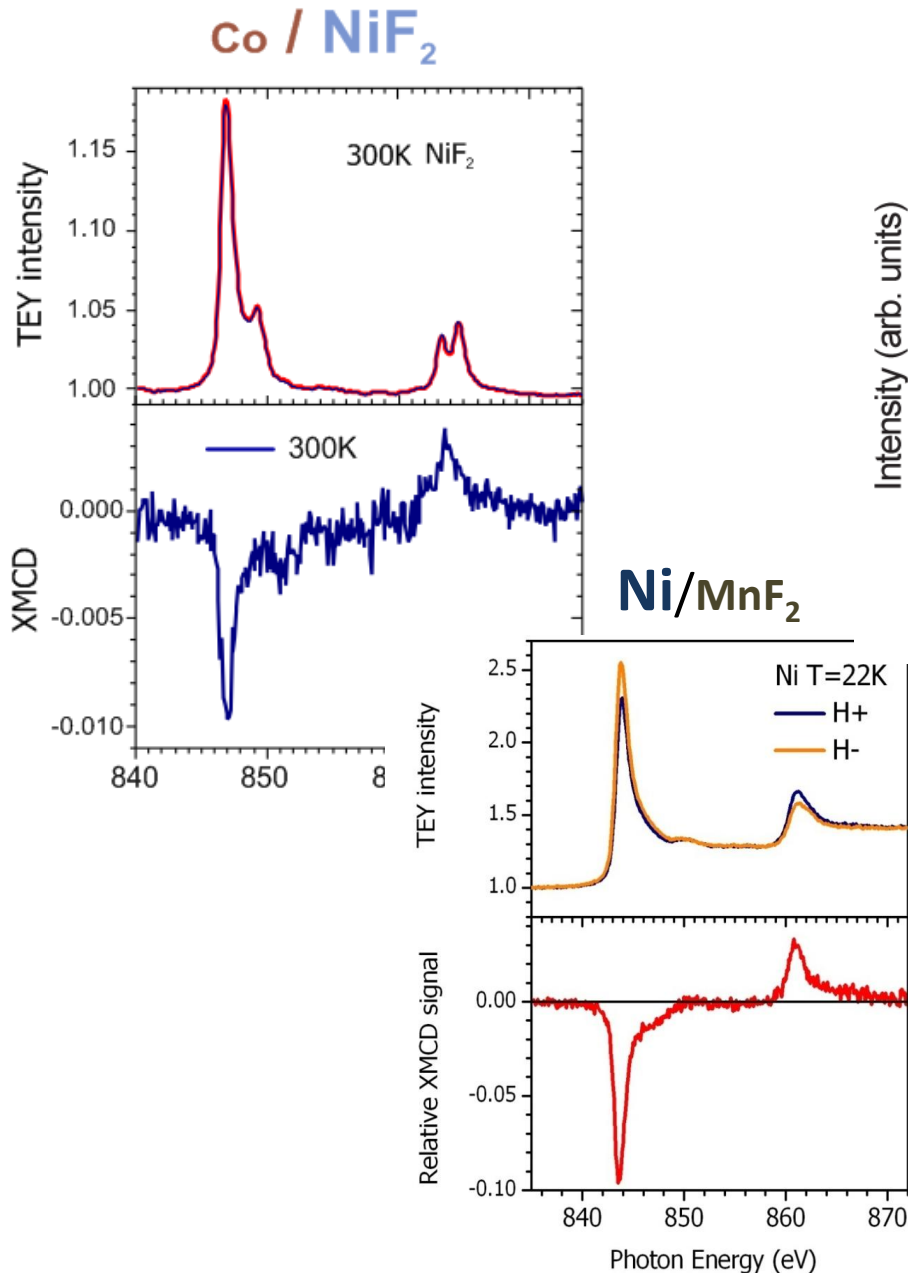
- В спектрах XAS выражено влияние кубического кристаллического поля (стрелки)
- В спектрах XMCD не видно влияния кристаллического поля – намагниченность обусловлена интерфейсным слоем



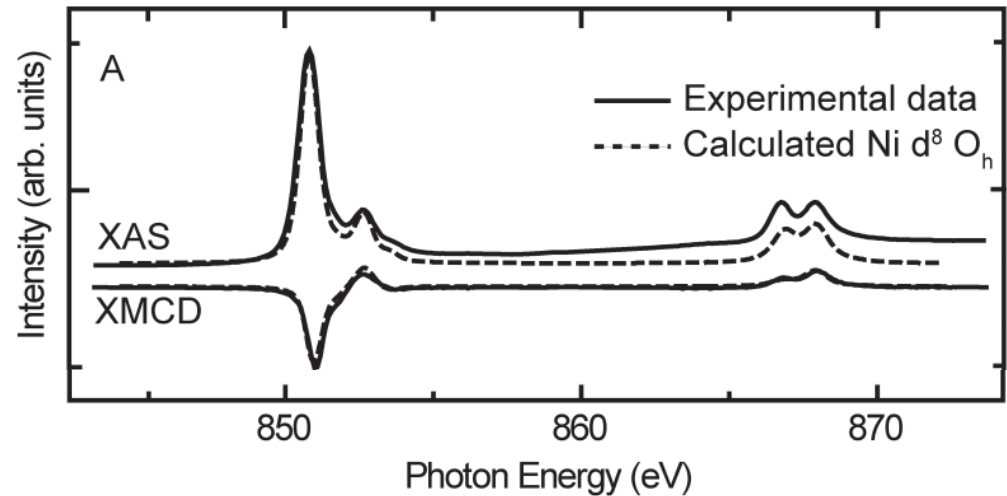
Расчетные (CTM4XAS) спектры
XAS и XMCD
 Mn_{2+} с учетом влияния
кристаллического поля

Crystal-field atomic multiplet model (van der Laan and Kirker 1992; van der Laan and Thole 1991)

Структура L-края поглощения NiF_2



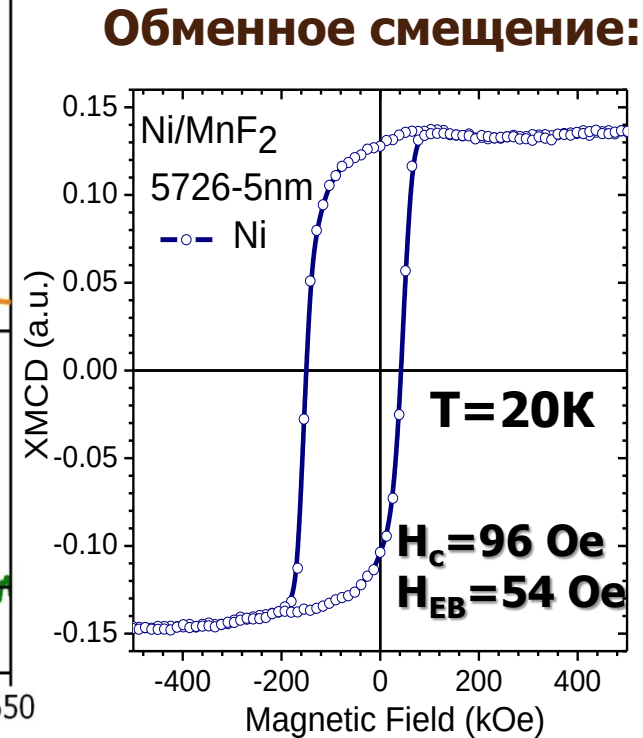
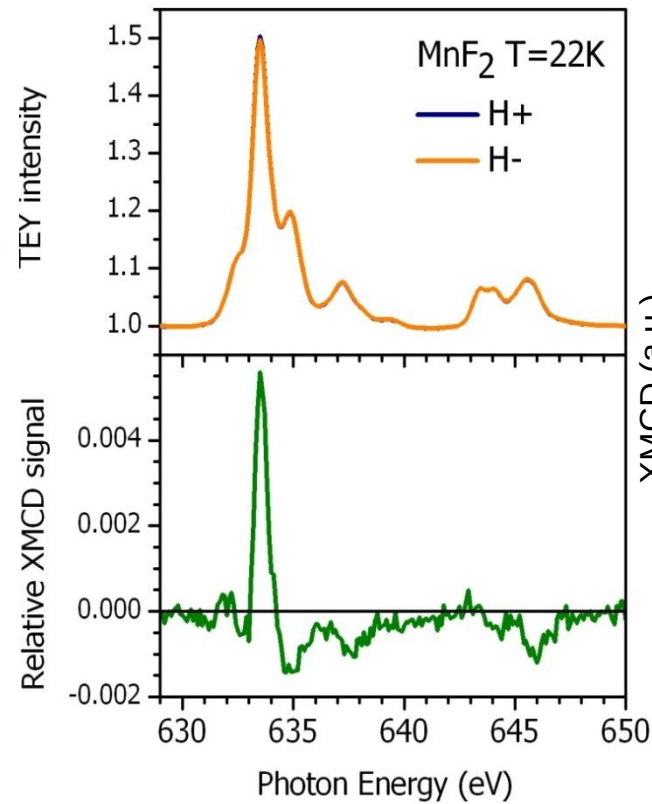
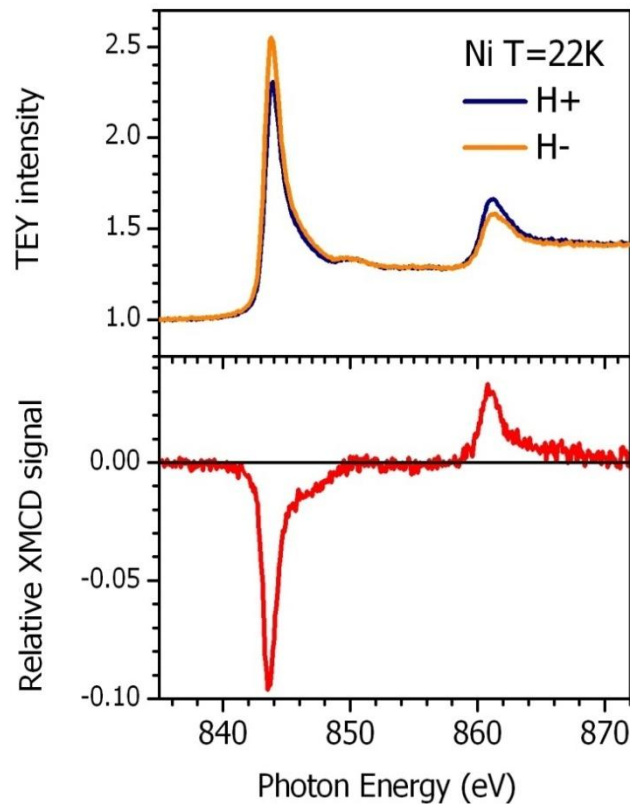
Расчетные спектры Ni^{2+}



Crystal-field atomic multiplet model (van der Laan and Kirkma 1992; van der Laan and Thole 1991)

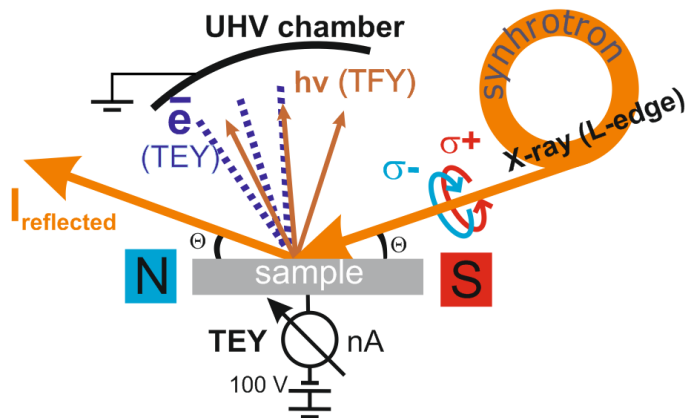
- Спектры XAS соответствуют иону Ni^{2+} в кубическом кристаллическом поле
- Для спектров XMCD влияние кристаллического поля не выражено и они “подозрительно напоинают” металлический Ni

Эффект магнитной близости в гетероструктурах Ni/MnF₂

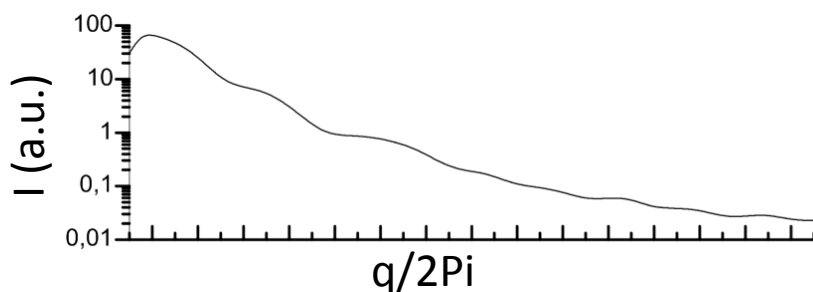


- ❖ В Ni/MnF₂ так же как и в Co/MnF₂ наблюдается наведенная намагниченность Mn²⁺ антипараллельная слою Co
- ❖ Сигнал XMCD наблюдается лишь при низких температурах
- ❖ Эффект “обменного смещения” наиболее выражен в системы Ni/MnF₂

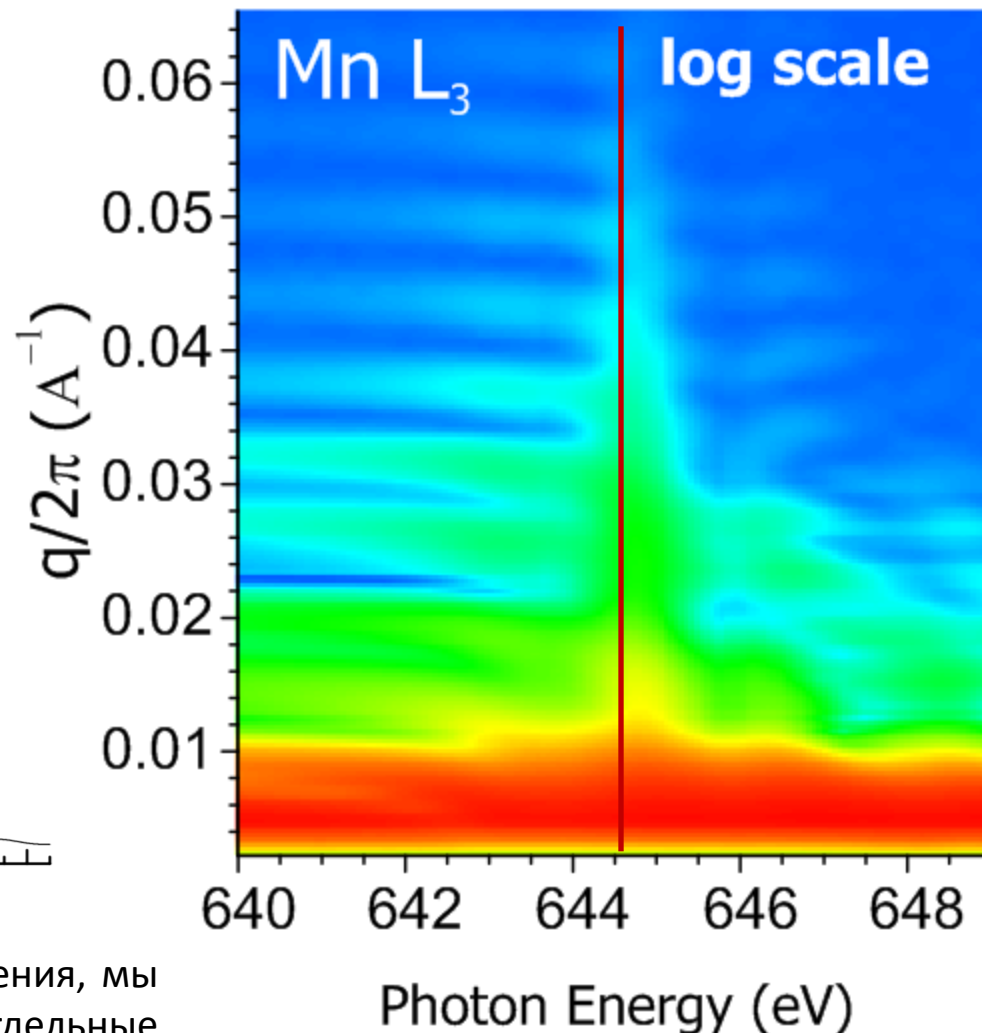
Спектральные зависимости кривых отражения



- 2D-карта $I(q;E)$ спектральной зависимости кривой отражения $I(q;E)$ вблизи L-края Mn

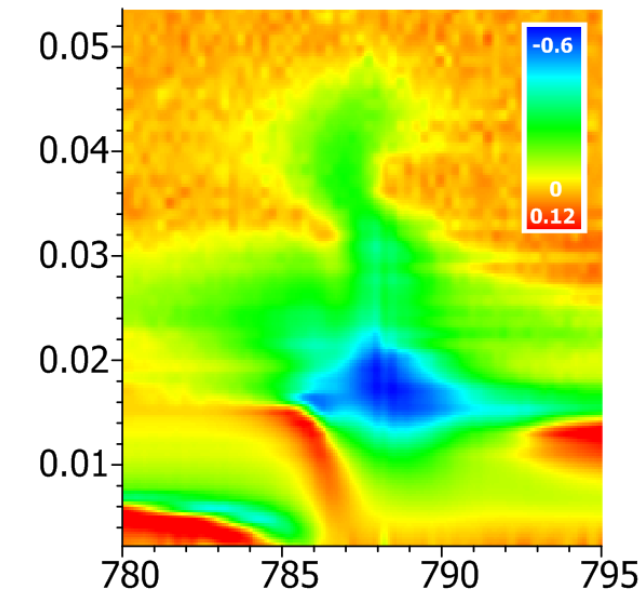
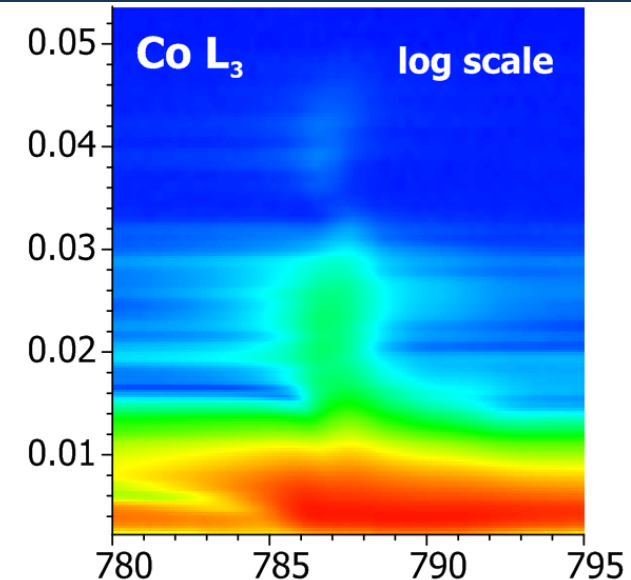
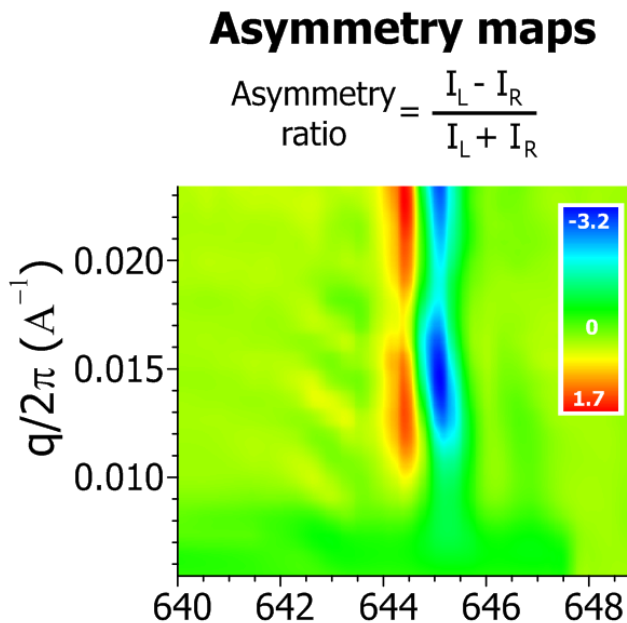
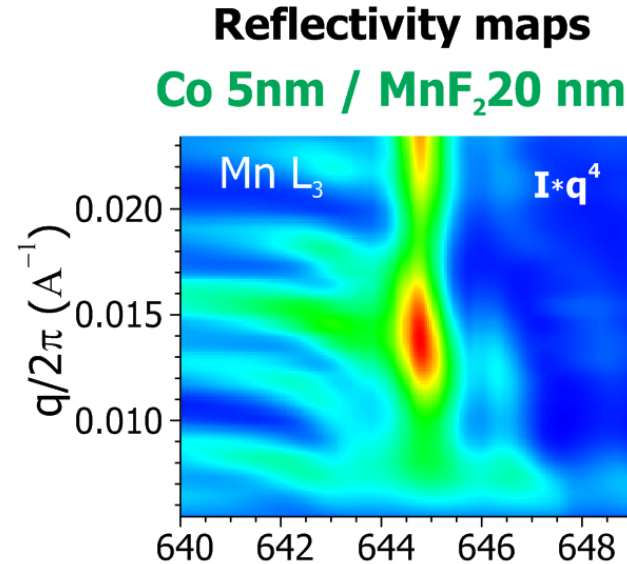


- Измеряя резонансные кривые отражения, мы можем “включать/выключать” отдельные интерфейсы



Спектральная зависимость асимметрии отражения

- Наблюдаются области с различными знаками асимметрии
- Только по картам или фиттированию можно судить о направлении намагниченности
- Можно выбрать наилучшие параметры $q(\text{\AA}^{-1})$ и $E(\text{eV})$ для снятия элементарно селективных кривых намагничивания
- Повышается достоверность фиттирования

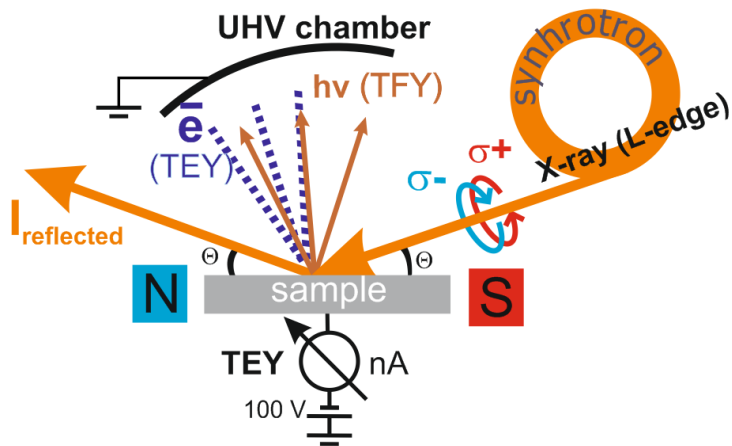


Photon Energy (eV)

Основные результаты:

- В ходе исследований методом рентгеновского циркулярного дихроизма (**XMCD**) в гетероструктурах **Ni/MnF₂** и **Co/NiF₂** был обнаружен “эффект магнитной близости” (наведенная намагниченность)
 - Оценена толщина слоя с наведенной намагниченностью (0.5 ML при 300K)
 - Изучено проявление “эффекта магнитной близости” для различных ориентации интерфейса ФМ/АФМ: (111),(110) и (100) для **MnF₂** и (110),(100) для **NiF₂**, а так же в зависимости от размера кристаллографических доменов и морфологии поверхности эпитаксиальной пленки АФМ
-
- Использование метода рентгеновской резонансной магнитной рефлектометрии (**XRMR**) позволило изучить проявление слабого “эффекта близости” в структурах **Ni/MnF₂**, а так же получить дополнительные сведения о системе **Co/NiF₂**
 - Полученные 2D-карты **I(q;E)** спектральных зависимостей кривых отражения **I(q;E)** позволяют подобрать подходящие параметры **q(Å⁻¹)** и **E(eV)** для снятия элементарно селективных кривых намагничивания, с большей уверенностью судить о направлении намагниченности, а так же повысить достоверность фиттирования

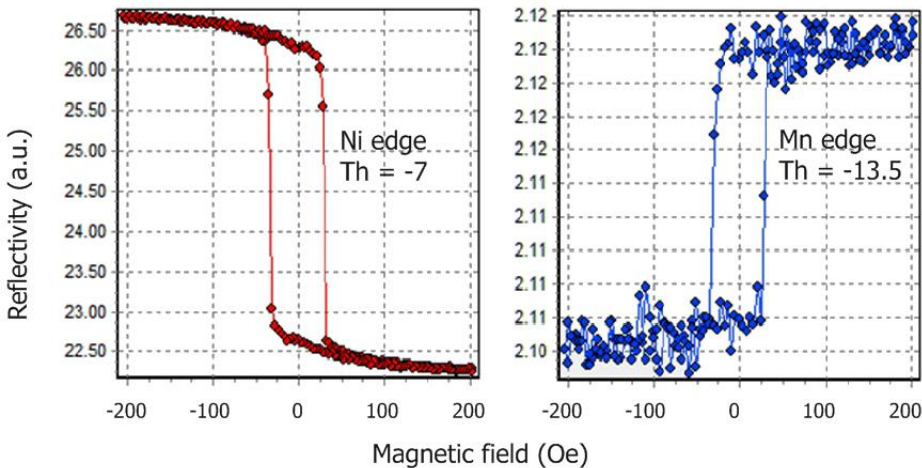
Результаты рентгеновской резонансной магнитной рефлектометрии X-ray resonant magnetic reflectivity (XRMR)



✦ Хотя в XMCD для Ni/MnF₂ сигнал виден лишь при низких температурах в XRMR отчетливый сигнал виден при 300K

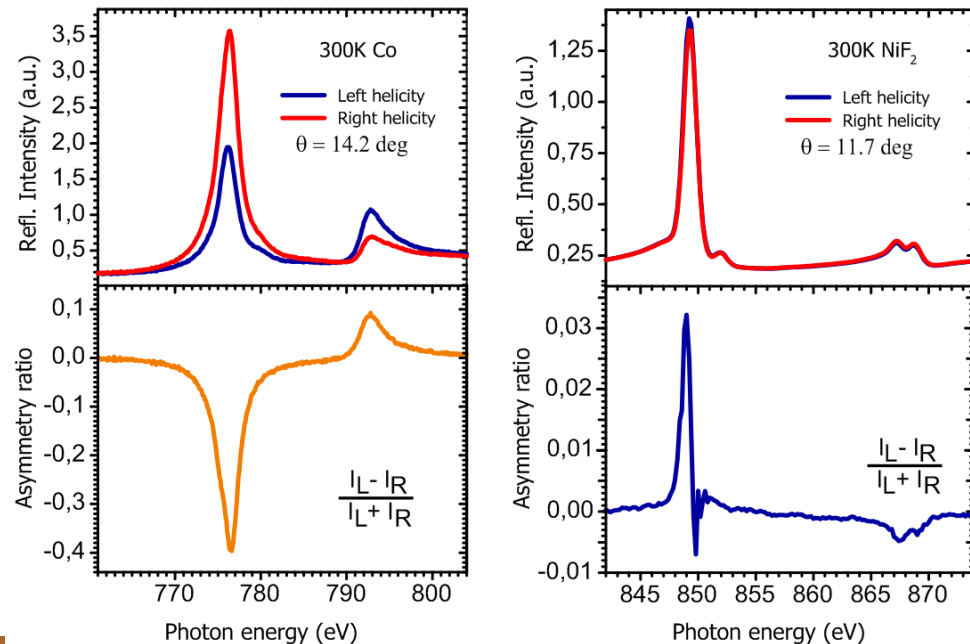
✦ В спектральных зависимостях асимметрии отражения структур Co/NiF₂ моменты Co и Ni противоположны

Ni/MnF₂ T=300K



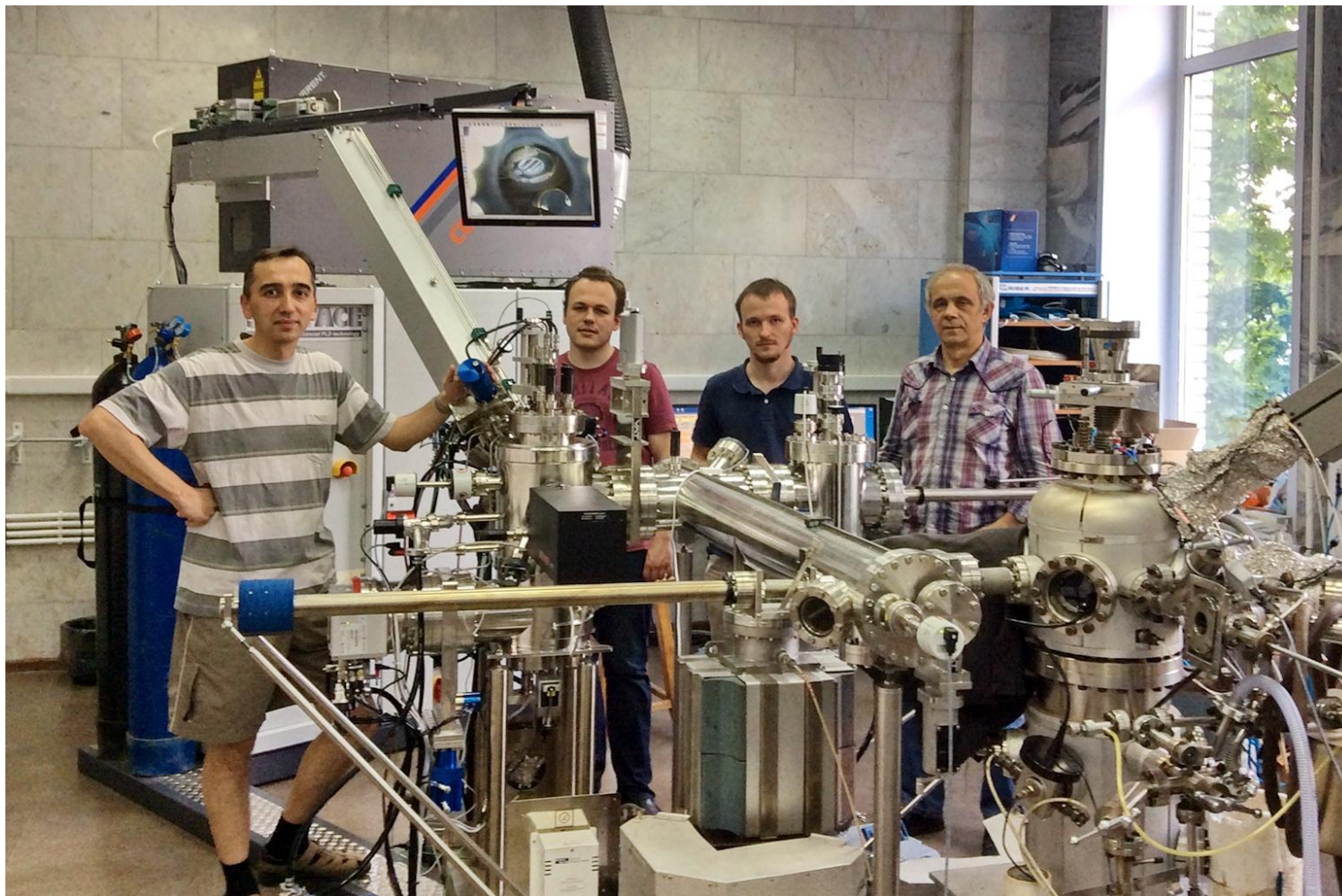
Элементно-селективные кривые намагничивания Ni/MnF₂ (q, E fix.)

Co / NiF₂



Спектральные зависимости кривых отражения (q fix.)

Спасибо за внимание



vfedorov@fl.ioffe.ru

Рост гетероструктур ферромагнетик/антиферромагнетик методом молекулярно лучевой эпитаксии (МЛЭ)

- ❖ Кремний (111), (001) – универсальная и доступная подложка, отработанная технология; CaF_2 , MnF_2 и NiF_2 – возможен рост путем термического испарения.
- ❖ CaF_2 – хорошо согласованны буферный слой, анизотропная поверхность (110)/Si(001), атомно-гладкая поверхность (111)/Si(111)
- ❖ MnF_2 и NiF_2 – антиферромагнитные фториды $T_{\text{Нееля}}$ NiF_2 - 73 К MnF_2 -67К (тетрагональные); показана возможность стабилизации метастабильных ромбических фаз при эпитаксиальном росте на CaF_2/Si

- ❖ “Магнитомягкий” Ni (ГЦК) и “магнитожесткий” Co (ГПУ при нормальных условиях)
- ❖ Магнитокристаллическая анизотропия Co сильно изменяется при переходе ГЦК-ГПУ
- ❖ Ni обладает существенной константой магнитострикции
- ❖ ГЦК решетки Co и Ni согласуются с CaF_2 как 3/2 (3%)

Свободная энергия поверхности

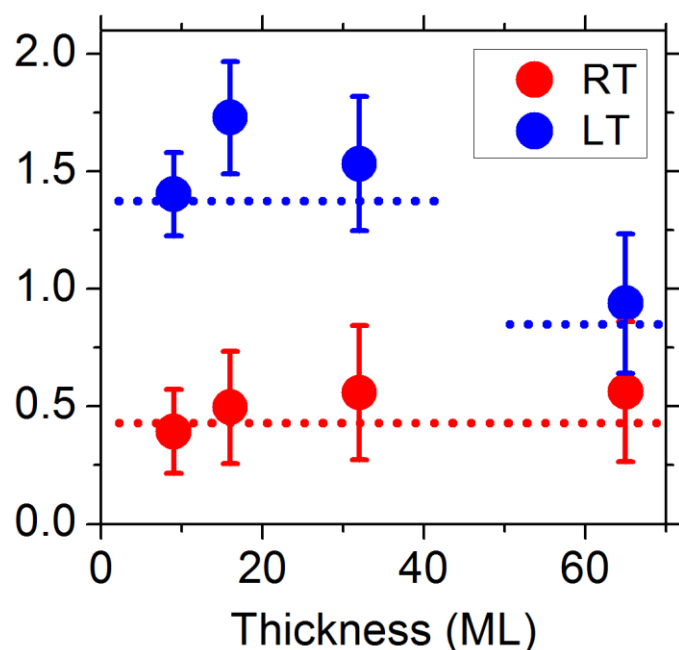
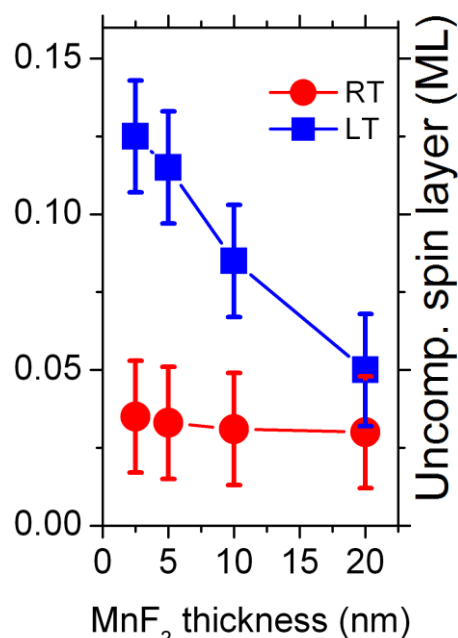
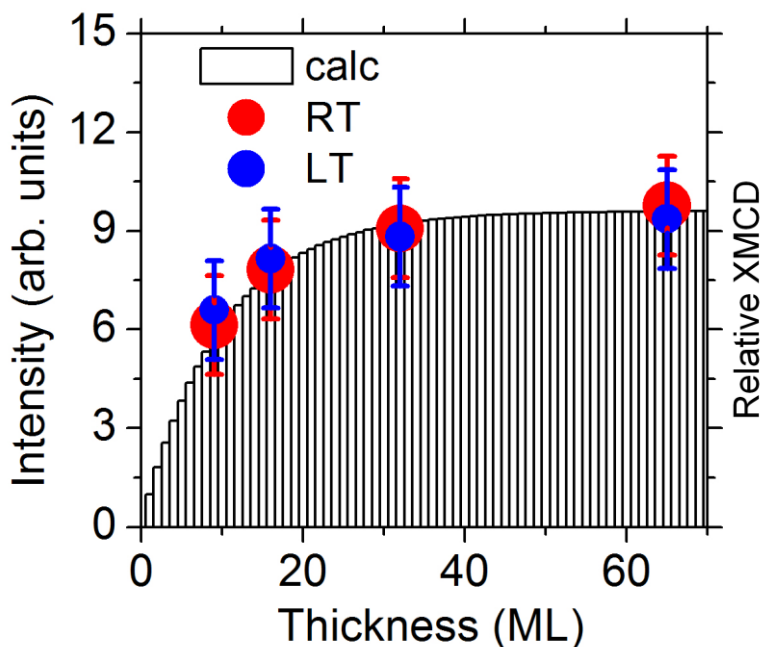
- $A_{\text{Co(Ni)}} = 2500\text{--}2900 \text{ erg/cm}^2$
 - $A_{\text{CaF}_2} (111) = 450\text{--}550 \text{ erg/cm}^2$
- Островковый механизм роста Фольмера –Вебера

Самоупорядочение → литография

Оценка интенсивности сигнала дихроизма MnF_2

- Серия образцов с толщиной АФМ слоя 2.5/5/10/20 nm
- Оценим характерную глубину выхода фотоэлектронов
- 59% (XMCD/L_3) – теоретически дихроизм от Mn^{2+}
- Пусть все упорядоченные моменты Mn^{2+} находятся в пределах первого монослоя

$$n_{\text{att}} = 10\text{ML} (3.1 \text{ nm})$$



$$I(N) = I_0 \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-n/n_{\text{att}})$$

Интенсивность XAS от N монослоев

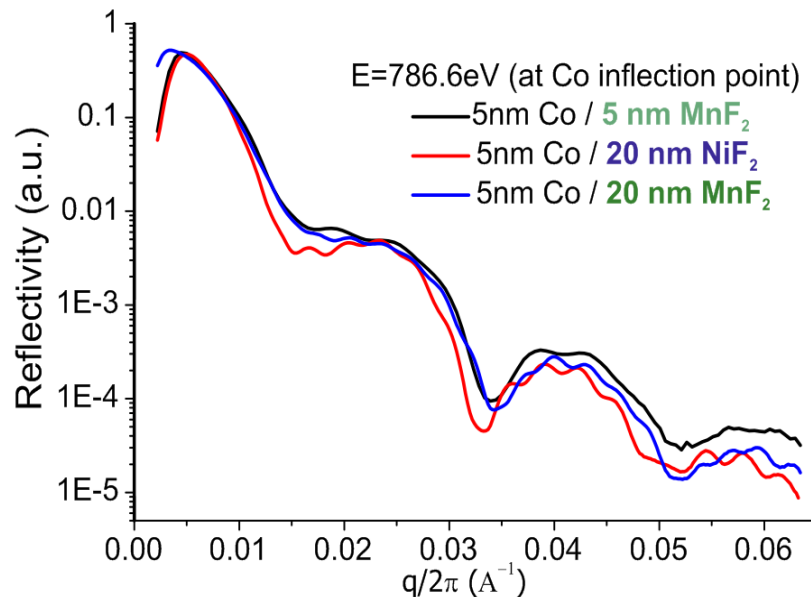
$$\alpha = \frac{I(N)}{I_0} \frac{\text{relative XMCD}}{0.59} \frac{1}{P \cdot \cos(\theta)}$$

Число упорядоченных спинов
(доли монослоя)

Рентгеновская резонансная магнитная рефлектометрия

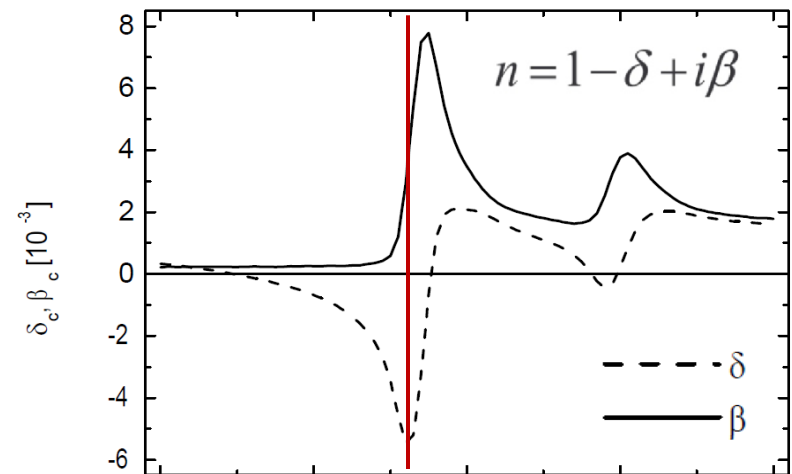
X-ray resonant magnetic reflectivity (XRMR)

- ❖ “Переходы с подуровней расщепленных вследствие спин-орбитального взаимодействия на уровни расщепленные обменным взаимодействием”
- ❖ Например: L-край поглощения ($2p^63d^n \rightarrow 2p^53d^{n+1}$) (для переходных 3d-элементов и их соединений)
применимо так же и к (3d;4d;4f,5d)
- ❖ Циркулярно-поляризованное излучение возбуждает электроны с преимущественной ориентацией спина



- ❖ Измеряя резонансные кривые отражения, мы можем “включать/выключать” отдельные интерфейсы

Поведение оптических констант Co
вблизи L-края поглощения



beta – поглощение (спектр поглощения XAS)

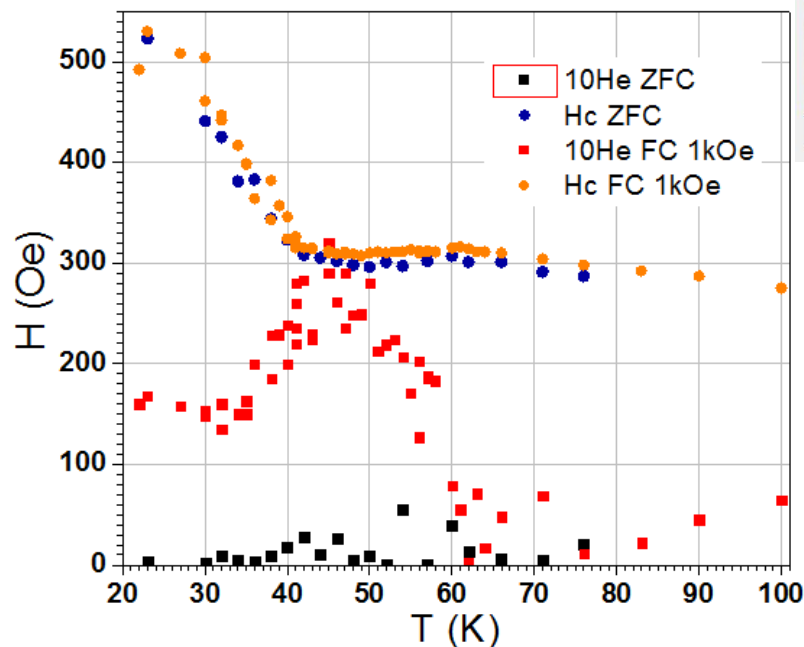
delta – определяет “контрастность” границы раздела, связана с beta через преобразования Крамерса-Кронига

Точка перегиба

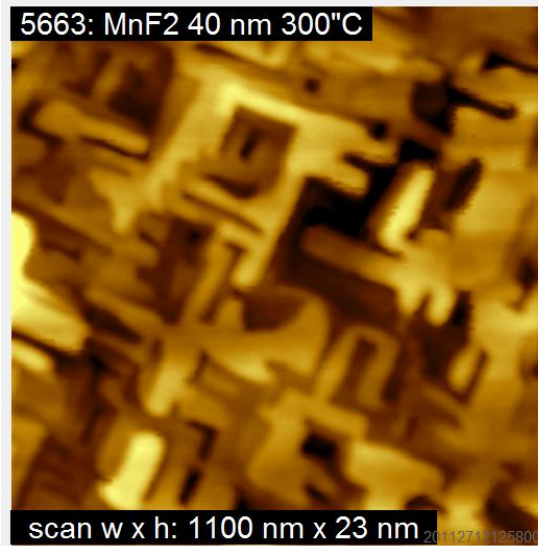
Co - 786.6eV – максимум δ , но β мало

MnF₂ (100) / CaF₂ (001) / Si (001)

- Arrays of Cobalt and Nickel epitaxial nanoparticles with crystalline structure (fcc)
- Domain-size-dependent exchange bias

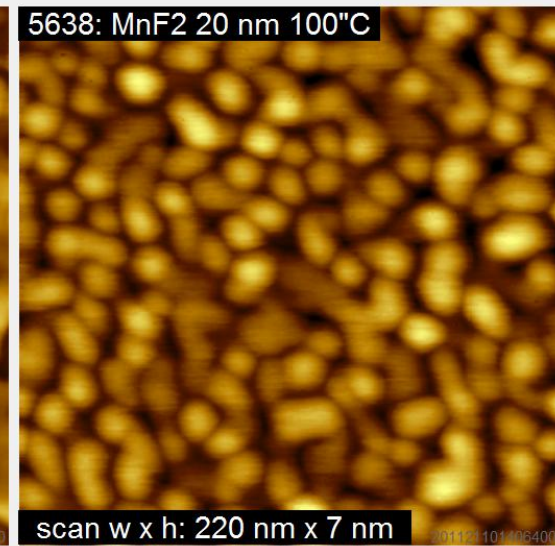


40 nm 300 C



1100 x 1100 x 23 nm

20 nm 100 C



220 x 220 x 7 nm

- MnF₂ crystalline domain size:
250x50 nm **20x10 nm**