Объединённый институт ядерных исследований
Лаборатория нейтронной физики

Тема доклада:

«Сосуществование сверхпроводимости и ферромагнетизма в слоистых наноструктурах»

Докладчик: Жакетов В.Д.

Участники работы:

- **ОИЯИ:** В.Д. Жакетов, Ю.В. Никитенко, А.В. Петренко, В.Л. Аксёнов – нейтронные исследования
- **Центр Гельмгольца**, Берлин: Ф. Раду - изготовление образцов магнетронным распылением, тестирование рентгеном
- **Max-Planck Institute, Stuttgart:** Ю.Н. Хайдуков – магнитометрия и нейтронные исследования
- **НИЦ «Курчатовский Институт»**: Э.Х. Мухамеджанов, М.М. Борисов – синхротронные исследования

Актуальность

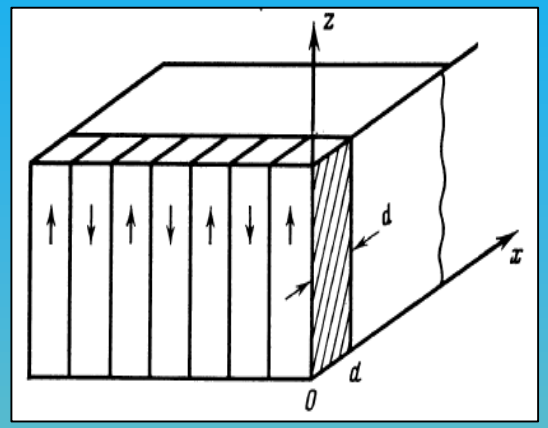
Магнитные свойства сверхпроводников антагонистичны магнитным свойствам ферромагнетиков, поэтому в слоистых структурах ферромагнетик/сверхпроводник (F/S), где толщины слоёв порядка корреляционной длины сверхпроводящего или магнитного параметра порядка, возникают различные нетривиальные эффекты.

Один из таких эффектов – криптоферромагнитное состояние ферромагнетика, контактирующего со сверхпроводником. Оно проявляется, как образование особой доменной структуры в ферромагнетике, характерный размер которой порядка сверхпроводящей корреляционной длины в ферромагнетике $\xi_F \cong$ 1-10 nm или корреляционной длины в сверхпроводнике $\xi_S \cong$ 10-100 nm. Такое состояние было предсказано в некоторых теоретических работах и пока не было обнаружено экспериментально.

Исследование слоистых структур F/S интересно как с точки зрения фундаментальной науки так и прикладной, например для создания носителей информации, основанных на двойном кодировании с помощью магнитного момента и электрической проводимости, или для джозефсоновских кубитов на S/F/S структурах.

В нашей работе мы исследовали различные наноструктуры. Основным экспериментальным методом служила рефлектометрия поляризованных нейтронов на спектрометре РЕМУР.

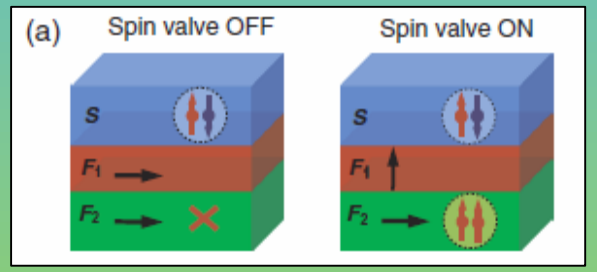
Криптоферромагнетизм



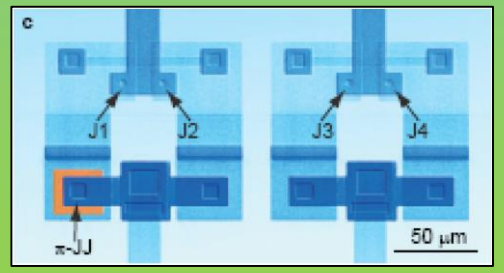
A.I. Buzdin, L.N. Bulaevski, Sov. Phys. JETP 94, 256-261 (1988)

Применение F/S наноструктур

Спиновый вентиль

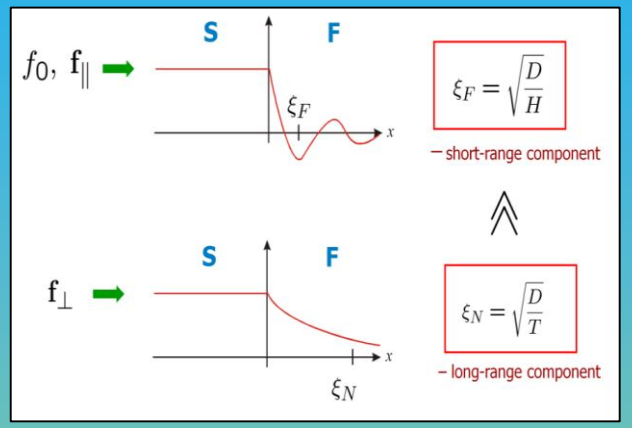


Джозефсоновский кубит на S/F/S структуре

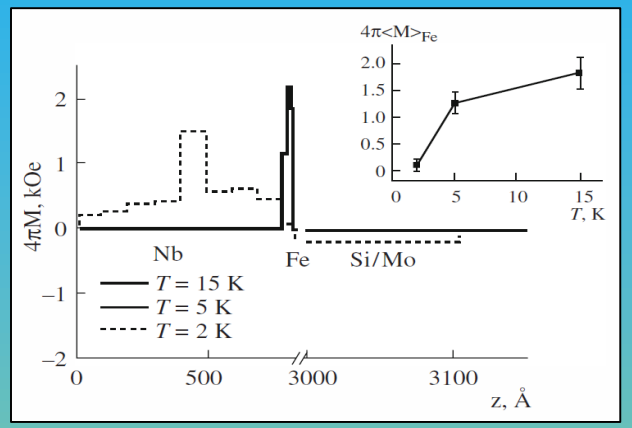


Другие эффекты в F/S наноструктурах

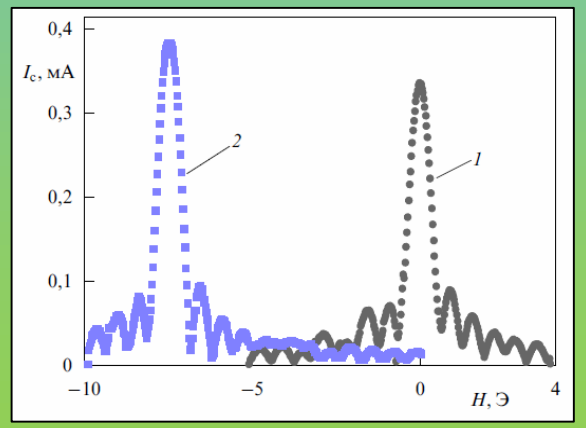
Эффект близости



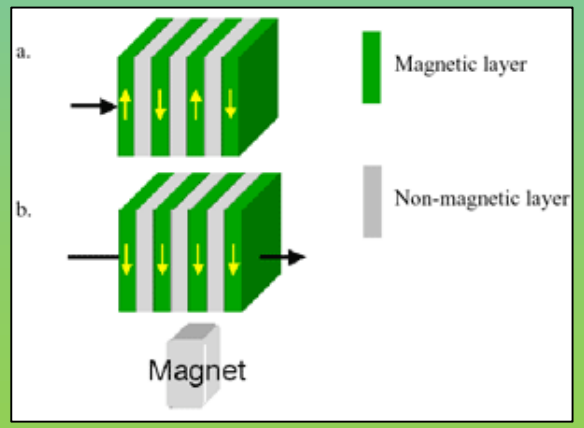
Обратный эффект близости



Зависимость критического тока от магнитного поля в S/F/S структуре (1) до и (2) после намагничивания



Косвенное обменной взаимодействие F-слоёв



Цели и задачи

Цель работы:

- обнаружение эффекта скрытого ферромагнетизма (криптоферромагнетизма) в слое ферромагнетика, контактирующего со сверхпроводником

Задачи:

- изготовление наноструктур с ферромагнитными слоями
- развитие методов GISANS и GIND

Описание образцов

Было изготовлено шесть образцов методом магнетронного распыления:

$Ti(3\ nm)/V(150\ nm)\ /\ Fe_{1-x}V_x(1\ nm)/A(1.2\ nm)/Fe_{1-x}V_x(1\ nm)\ /\ Nb(150\ nm)/Si(0.5\ nm)$

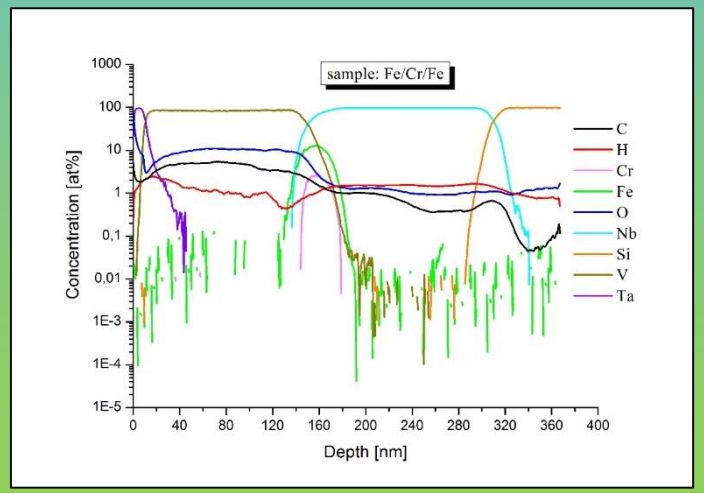
A = Cr; V

x = 0; 0.3; 0.6

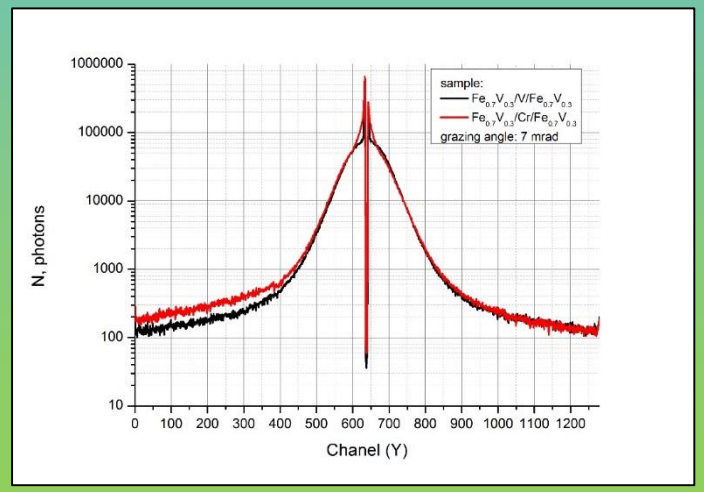
Ядерный профиль структуры был получен с помощью масс-спектрометрии. Доля Fe в ферромагнитном слое ≈ 0.12-0.17, толщина ферромагнитного слоя 19 нм с прослойкой из ванадия и 24 нм для образцов с прослойкой из хрома.

Результаты полученные с помощью синхротронного излучения показывают, что имеется две корреляционных длины (16 нм и более чем 100 нм) в образцах с прослойкой из хрома и одна корреляционная длина (16 нм) с прослойкой из ванадия.

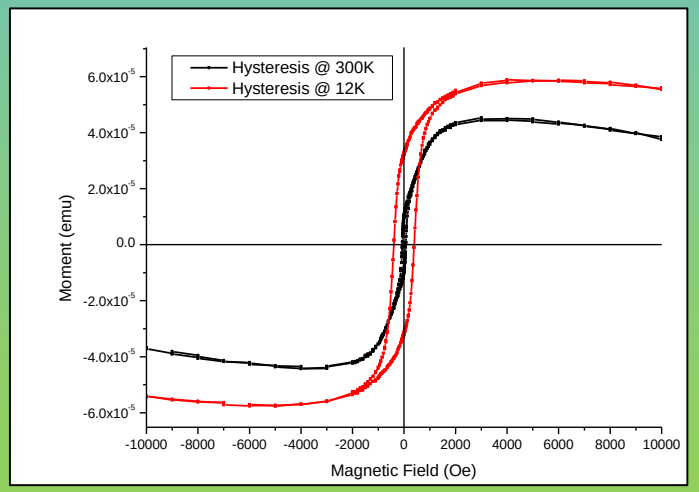
Магнитометрия показала, что намагниченности насыщения больше в 5-8 раз для образцов с прослойкой из хрома.



Масс-спектрометрия



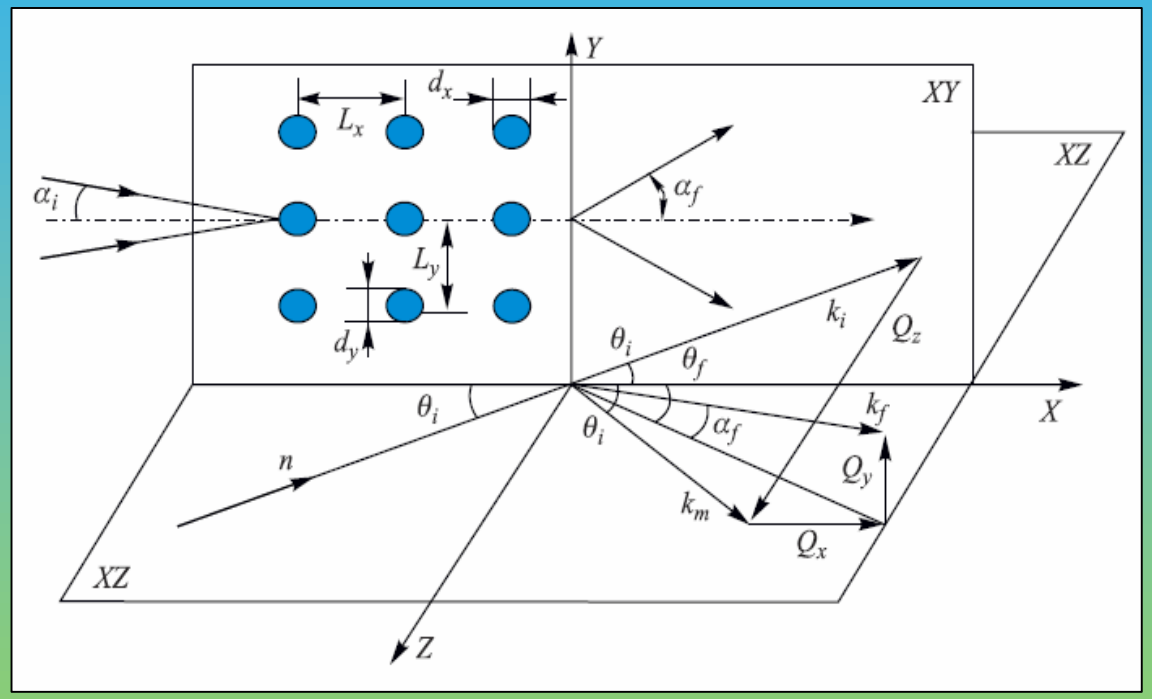
Синхротронное излучение



Магнитометрия

Рефлектометрия поляризованных нейтронов

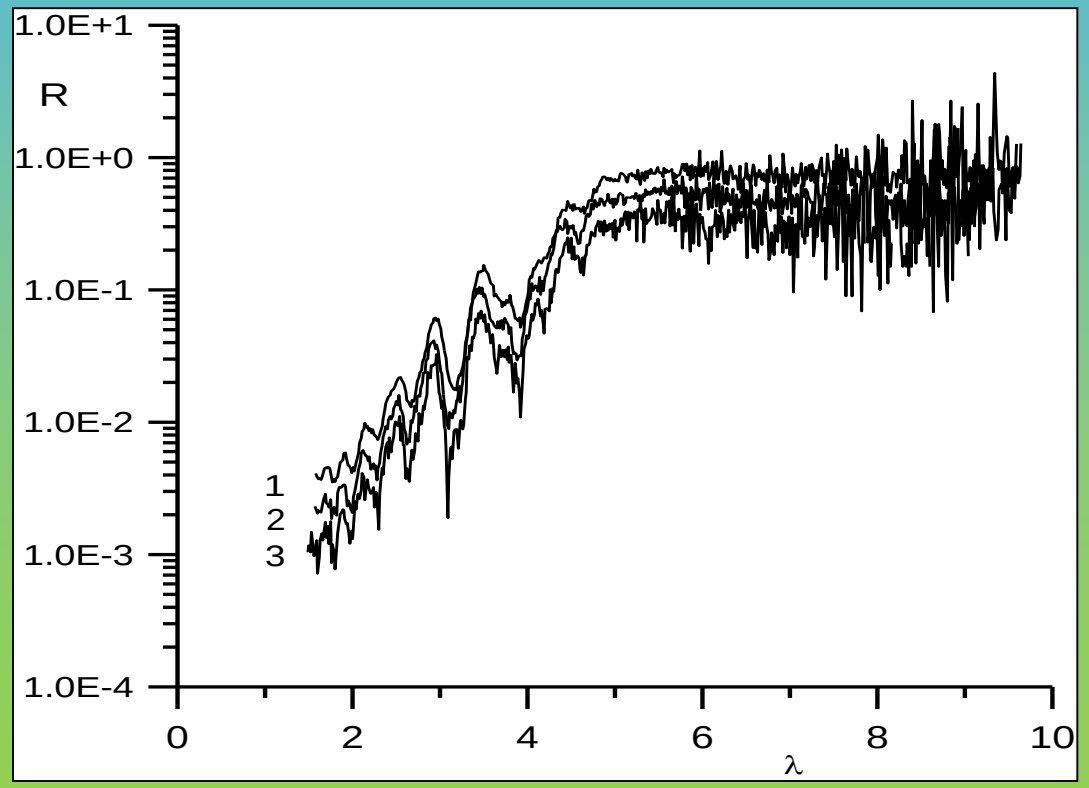
Основным экспериментальным методом служила рефлектометрия поляризованных нейтронов, так как метод удобен при исследовании магнитных наноструктур. Зависимость коэффициента отражения от длины волны может дать информацию о магнитном и ядерном профилях структуры. Рассеяние нейтронов даёт информацию о различных неоднородностях структуры: магнитных или сверхпроводящих доменах, кластерах, шероховатостях границ раздела. Рассеяние в плоскости падающего пучка может дать информацию о неоднородностях с корреляционной длиной 1-100 мкм, рассеяние в плоскости, перпендикулярной плоскости падающего пучка, - 1-1000 нм. Последняя методика известна, как «grazing-incidence small-angle neutron scattering» (GISANS) и «grazing incidence diffraction» (GIND).

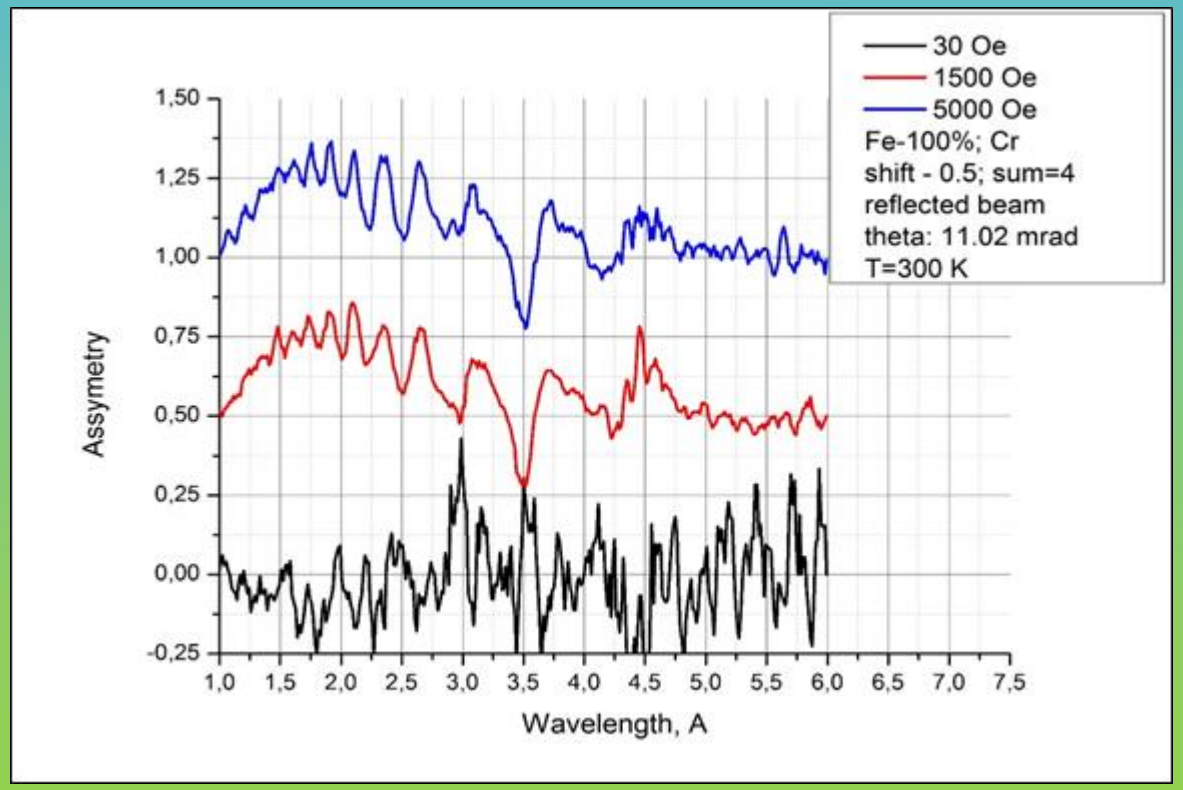


Коэффициент отражения

Для каждой структуры были получены зависимости коэффициента отражения от длины волны при различных магнитных полях и температурах. На их основе можно получить магнитный и ядерный профили структуры при различных внешних параметрах.

Спиновая асимметрия $A=\frac{I_{plus}-I_{minus}}{I_{plus}+I_{minus}}$ отражённого пучка показала специфическую зависимость от длины волны для образцов Fe/Cr/Fe и Fe/V/Fe при напряжённостях внешнего магнитного поля H=1.5-5 кЭ. Эта зависимость соответствует спин-флоп фазе, когда намагниченности ферромагнитых слоёв антипараллельны друг другу и перпендикулярны магнитному полю. Это означает, что ферримагнитные слои не перемешаны полностью.



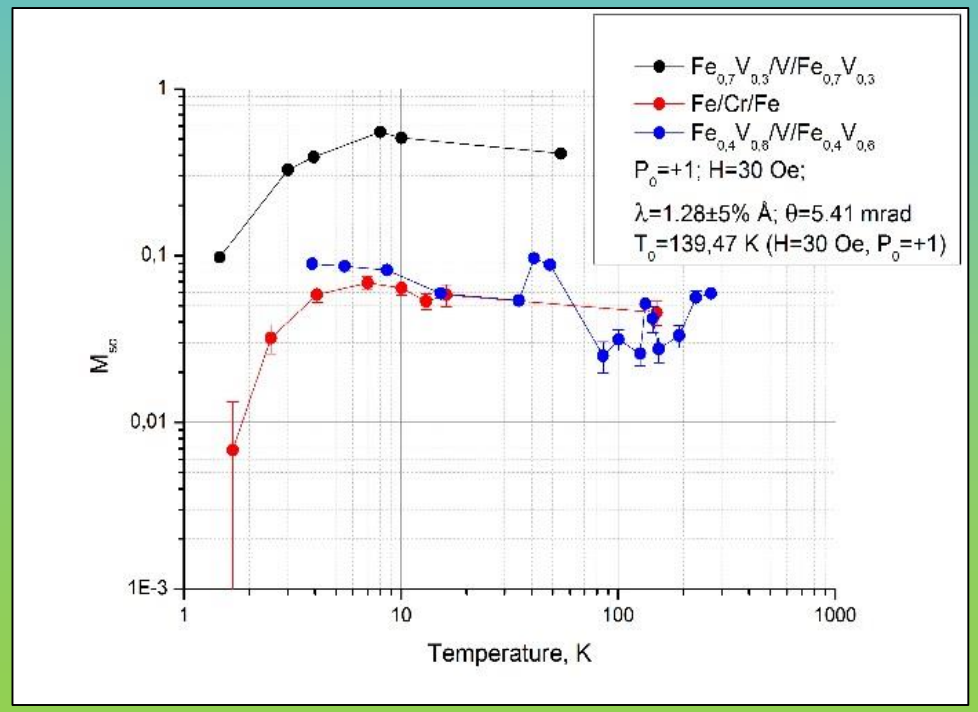


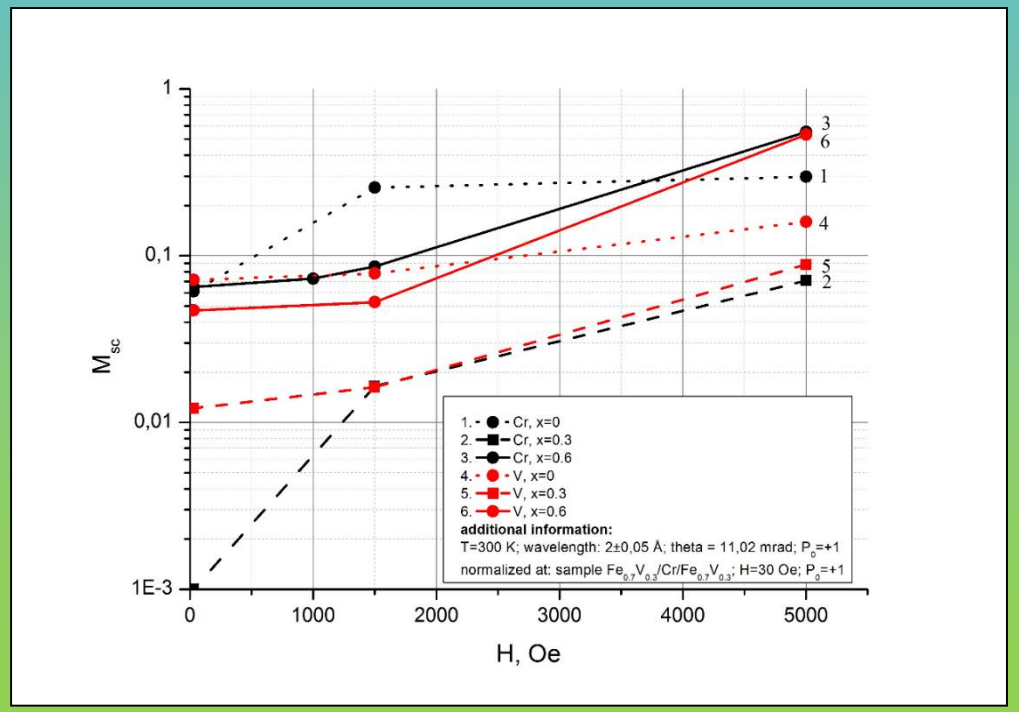
Рассеяние

Были получены зависимости рассеяния за апертуру детектора от температуры, магнитного поля, длины волны и от времени измерения.

Показано, что рассеяние $M_{sc} = 1 - \frac{I}{I_{T=300\,K}}$ возрастает с уменьшением температуры в диапазоне 300-8 К, затем на образцах $Fe_{0.7}V_{0.3}/V/Fe_{0.7}V_{0.3}$ и Fe/Cr/Fe рассеяние уменьшается с уменьшением температуры в диапазоне 8-1.5 К, но продолжает возрастать на образце $Fe_{0.4}V_{0.6}/V/Fe_{0.4}V_{0.6}$.

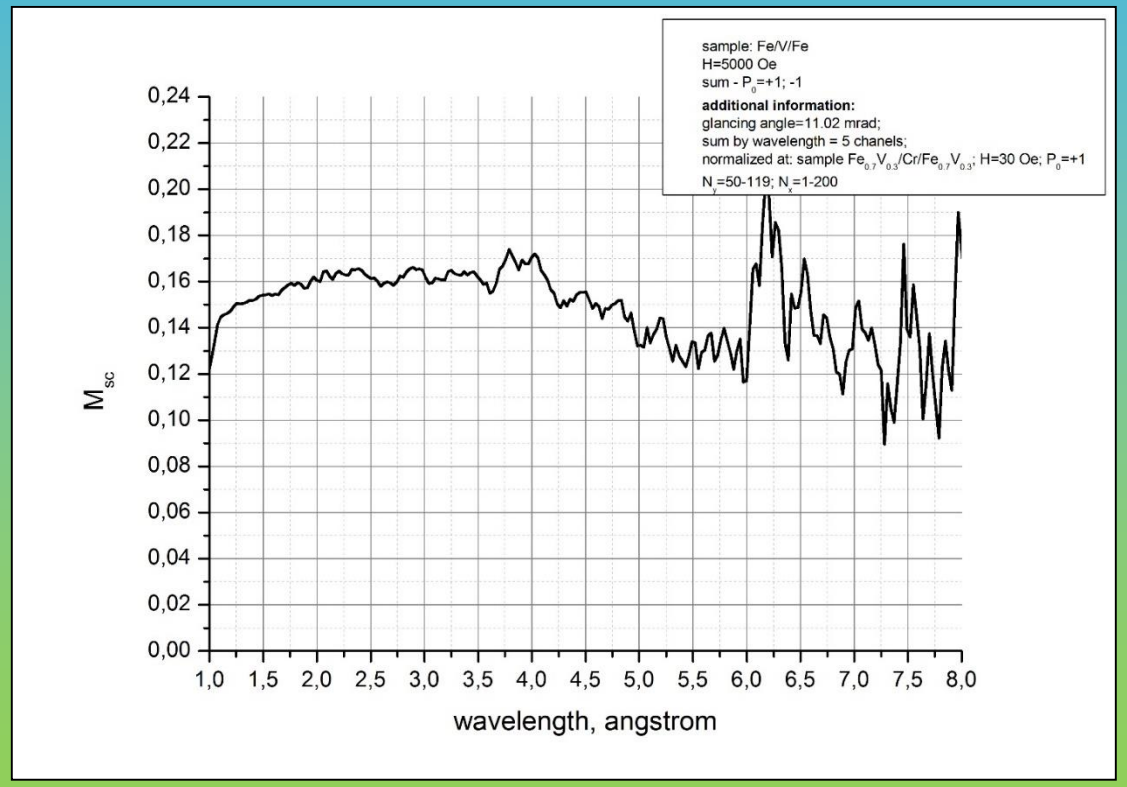
При температуре 300 К рассеяние возрастает с ростом напряжённости внешнего магнитного поля. Это связано с тем, что образцы неоднородные в плоскости слоёв. При низких же температурах <10 К видно обратное поведение: рассеяние уменьшается с увеличением напряжённости внешнего магнитного поля. Такое противоположное поведение может быть вызвано упорядочением магнитных доменов по направлению внешнего магнитного поля при низких температурах с увеличением напряжённости внешнего магнитного поля.

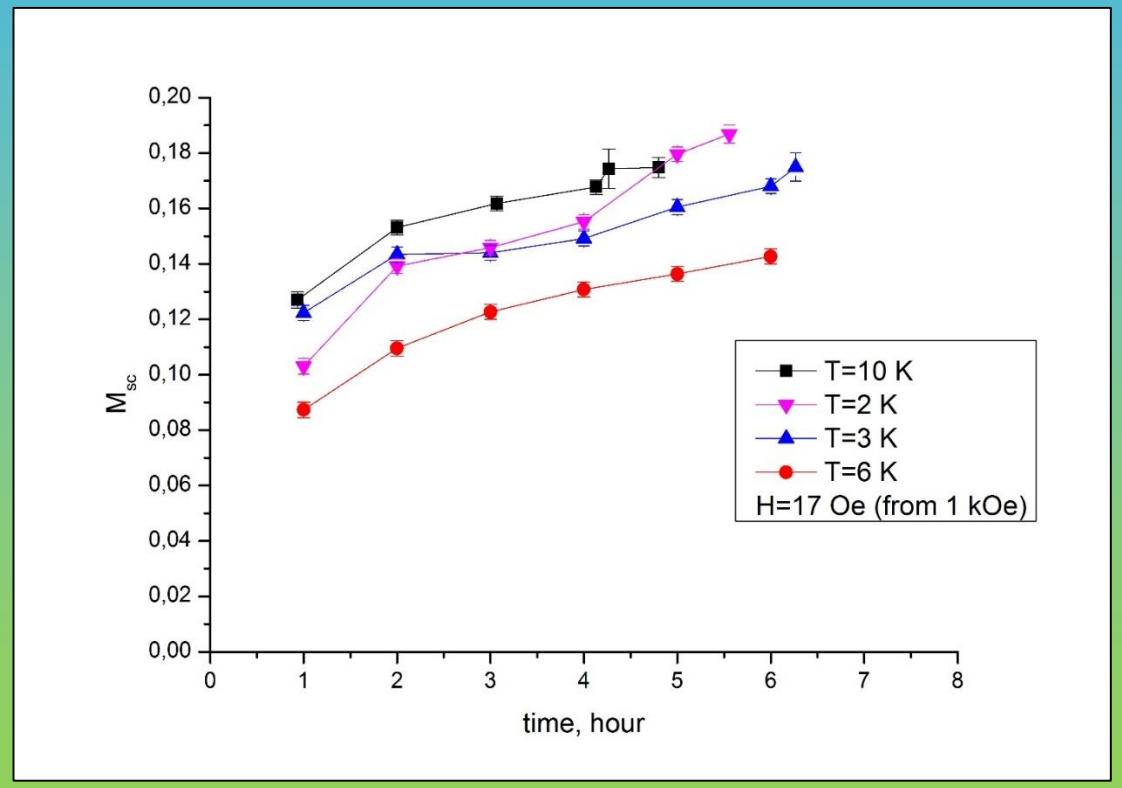




Зависимости рассеяния нейтронов от длины волны показали, что максимум рассеяния соответствует толщине магнитного слоя.

Рассеяние нейтронов изменяется в процессе измерения, это говорит о том, что установление магнитного порядка является кинетическим процессом, продолжающимся несколько часов.





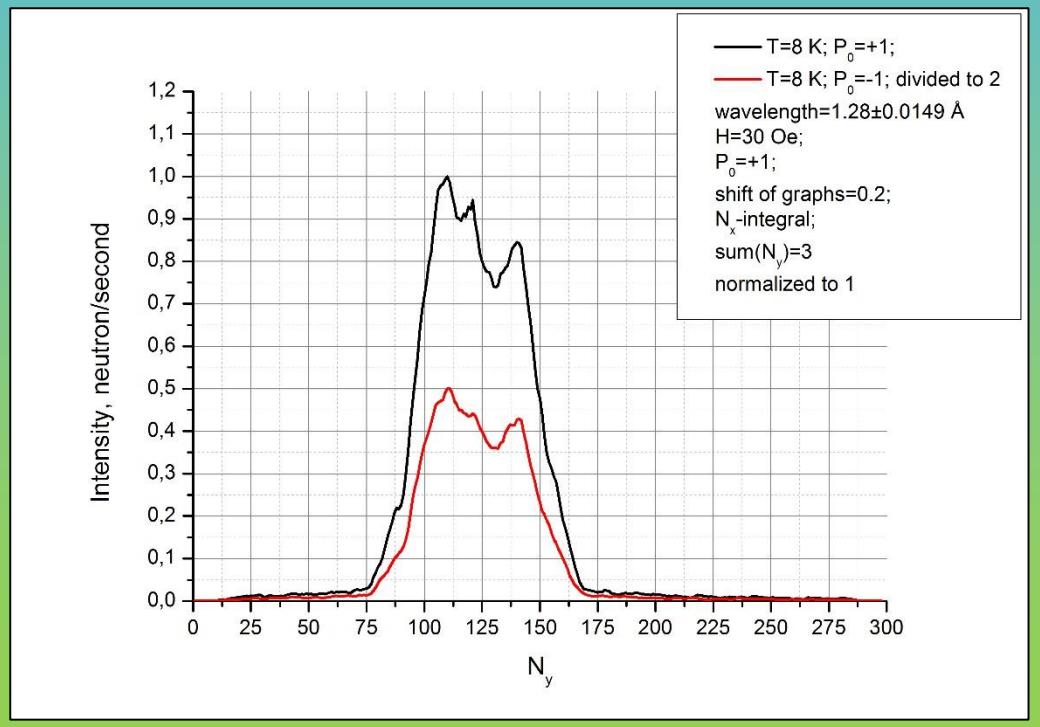
GISANS (Grazing-incidence small-angle neutron scattering) & GIND (Grazing incidence neutron diffraction)

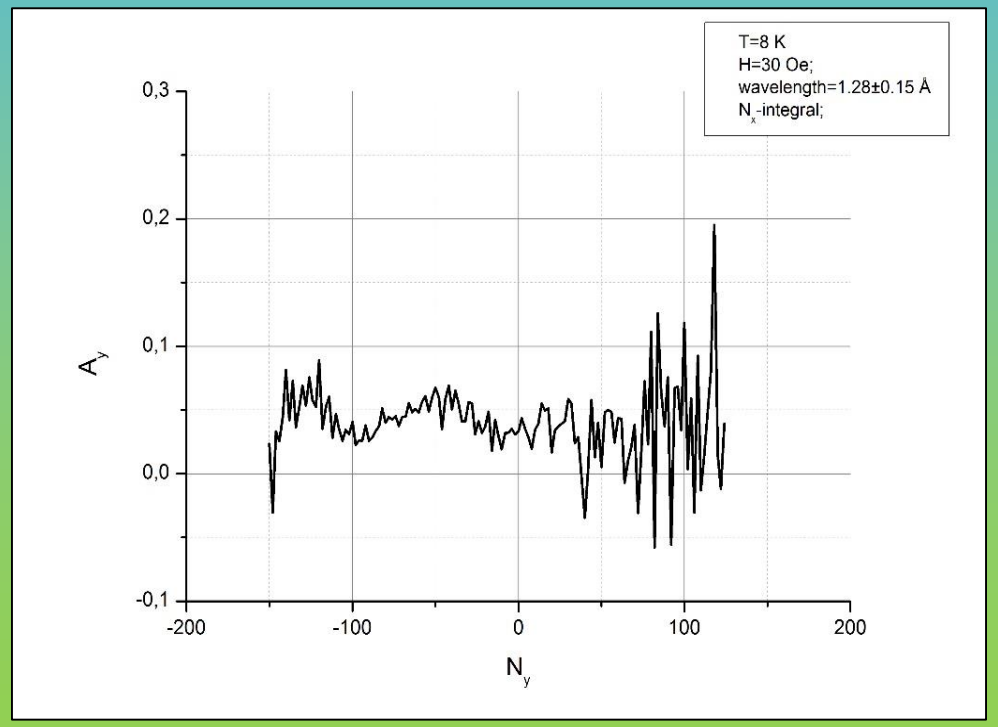
Результаты полученные методами GISANS и GIND показали наличие максимумов при температурах <50 K для образца $Fe_{0.7}V_{0.3}/V/Fe_{0.7}V_{0.3}$. Есть две теории, объясняющих данное явление:

- Это дифракция на магнитной нанорешётке, сформированной при низких температурах и подстраивающейся под сверхпроводящий параметр порядка
- Это каналирование нейтронов в нанорешётке, описанной выше.

Обе эти теории являются возможным доказательством индикации криптоферромагнитного состояния в слое ферромагнетика.

Спиновая асимметрия в XY плоскости для образца $Fe_{0.7}V_{0.3}/V/Fe_{0.7}V_{0.3}$ показывает уменьшение доменов, межплоскостного расстояния и намагниченности доменов с уменьшением температуры. Это заключение основано на поведении осцилляций и амплитуд этих зависимостей при различных температурах.





Заключение

- В диапазоне температур от 150 К до температуры перехода Nb в сверхпроводящее состояние в ферромагнитном слое формируется полидоменное состояние в виде решётки доменов

- Начиная с температуры сверхпроводящего перехода слоя ниобия 8К и ещё более сильно с температуры сверхпроводящего перехода слоя ванадия 4К вплоть до минимально достигнутой температуры 1.5 К под действием сверхпроводимости происходит модификация сформированной магнитной решётки. Такая магнитная структура подобна упорядоченной магнитной структуре сверхпроводящего ферромагнетика, названной в литературе как криптоферромагнетизм.

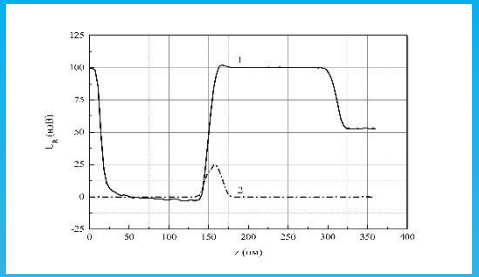
- Обнаружена спин-флоп фаза в Fe/Cr/Fe и Fe/V/Fe структурах при T=300 K и H=1.5-5 кЭ

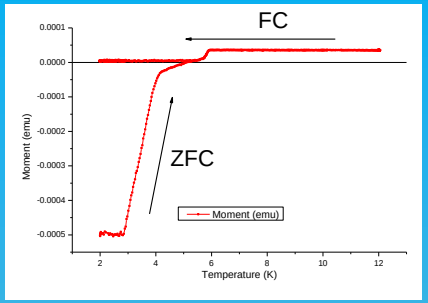
- Образцы неоднородны в плоскости слоёв, так как возрастает рассеяние нейтронов с ростом магнитного поля при T=300 K

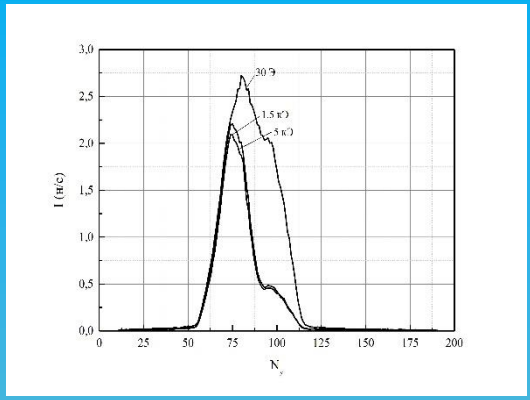
- Зависимости рассеяния нейтронов от длины волны показали, что максимум рассеяния соответствует толщине магнитного слоя, значения которых были получены с помощью масс-спектрометрии

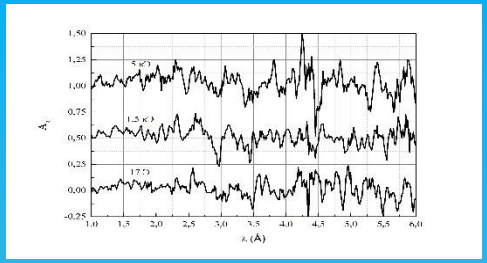
- Рассеяние нейтронов изменяется в процессе измерения, это говорит о том, что установление магнитного порядка является кинетическим процессом, продолжающимся несколько часов

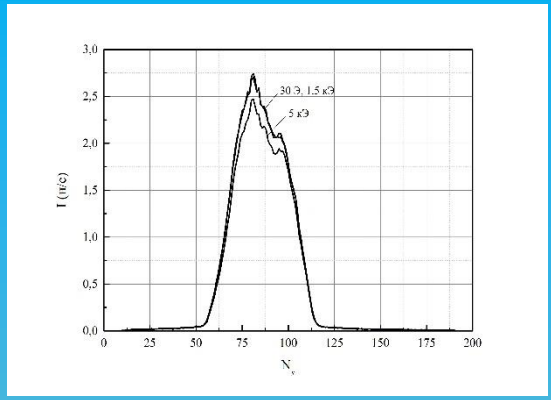
Спасибо за внимание

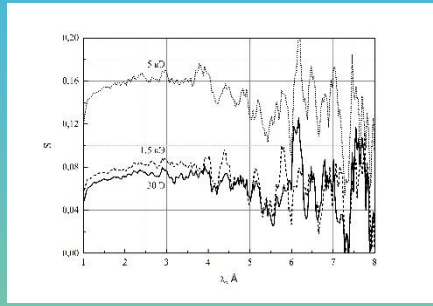


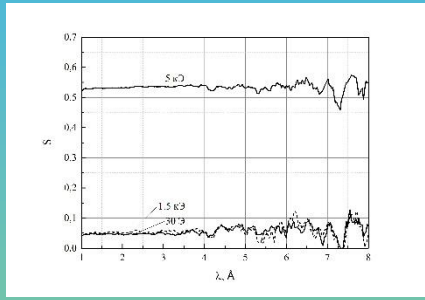

FC
ZFC
Moment (emu)
Temperature (K)

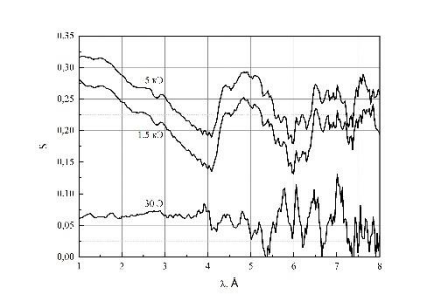


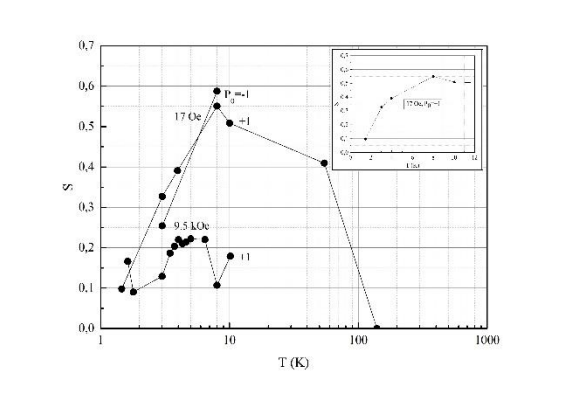


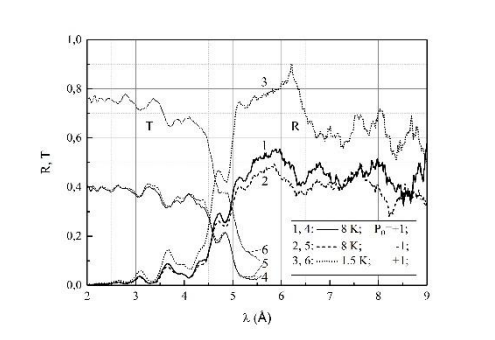


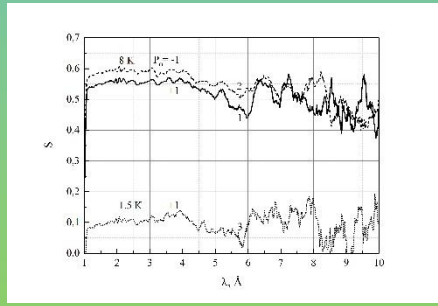


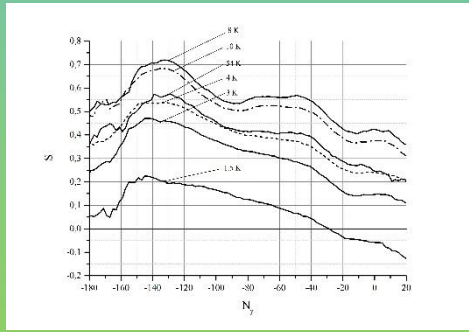


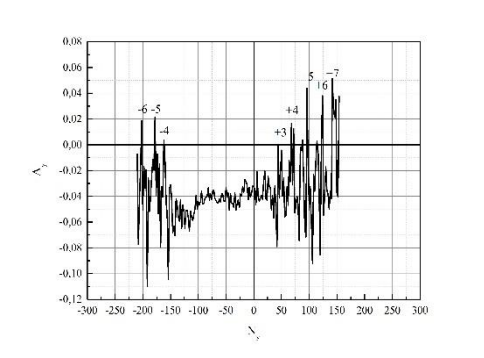


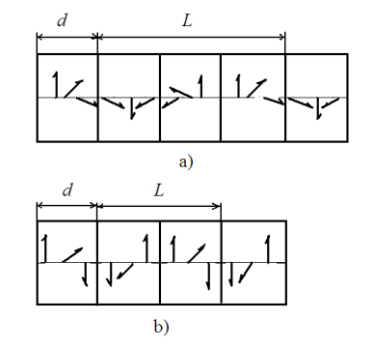
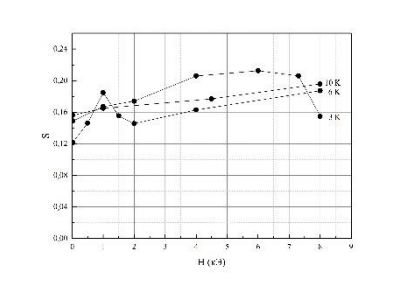
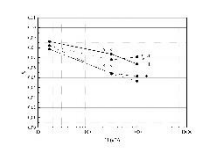











d
L
a)
d
L
b)