

Объединённый институт ядерных исследований

Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка

«Исследование сосуществования сверхпроводимости и ферромагнетизма в слоистой наногетероструктуре Nb/NiCu с помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов»

Докладчик: Жакетов Владимир



Коллаборация

- **Joint Institute for Nuclear Researches, Dubna, Russia**
Polarized neutron reflectometry (PNR), GISANS
V.D. Zhaketov, Yu.V. Nikitenko, A.V. Petrenko, V.L. Aksenov
- **National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia**
X-ray reflectivity (XRR), GISAXS
E.Kh. Mukhamedzhanov, M.M. Borisov
- **Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhniy Novgorod, Russia**
Magnetron sputtering
S.N. Vdovichev
- **Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, Russia**
Electrical resistance's measurements
L.Ya. Vinnikov
- **Max-Planck Institute, Stuttgart, Germany**
SQUID magnetometry, PNR, GISANS, XRR
Yu.N. Khaidukov
- **Institute for Nuclear Research, Hungarian Academy of Sciences, Debrecen, Hungary**
Secondary neutral mass-spectrometry (SNMS)
A. Csik
- **Helmholtz Scientific Research Center, Berlin, Germany**
Magnetron sputtering
F. Radu

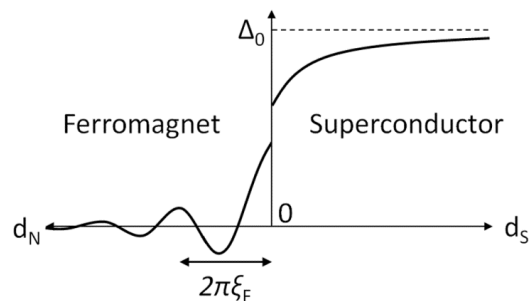
Содержание

1. Постановка проблемы
2. Экспериментальная методика, спектрометр РЕМУР
3. Результаты
4. Заключение, перспективы

Сосуществование сверхпроводимости и ферромагнетизма в слоистых структурах NiCu/Nb

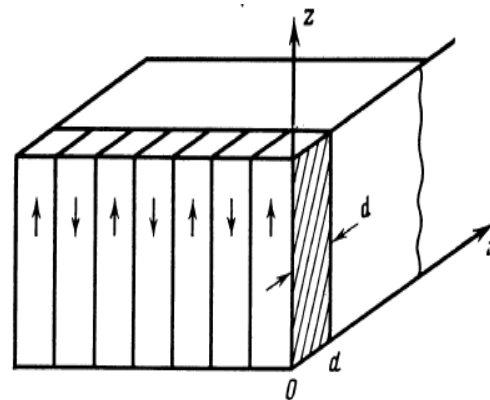
- Магнитное поведение ферромагнетиков и сверхпроводников противоположно
- Возможно два способа реализации сосуществования этих двух фаз в одном объёме
- Это возможно в некоторых объёмных материалах (UCoGe, URhGe, UGe₂), т.е. гомогенной среде
- Или в тонкой плёнке ферромагнетика, находящейся в контакте со сверхпроводником ($d_F < \xi_F$) – негомогенная среда
- В таких системах возможен эффект близости, и для ферромагнетика – осциллирующий характер параметра порядка
- **Спин-триплетное состояние куперовских пар**
- **Модификация доменной структуры под воздействием сверхпроводимости -> криптоферромагнетизм**
- **Обратный эффект близости**

Эффект близости



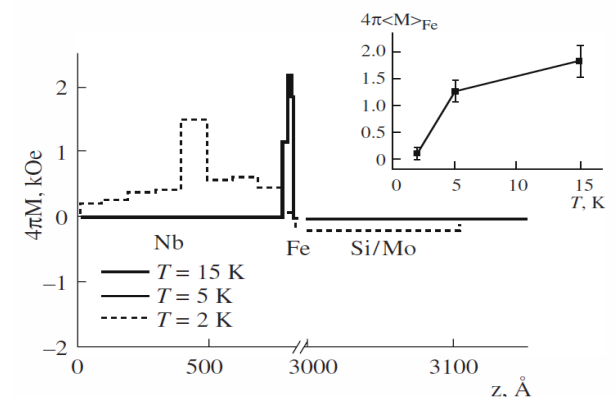
Guoxing Miao.
Spintronics Driven by Superconducting Proximity Effect

Криптоферромагнетизм

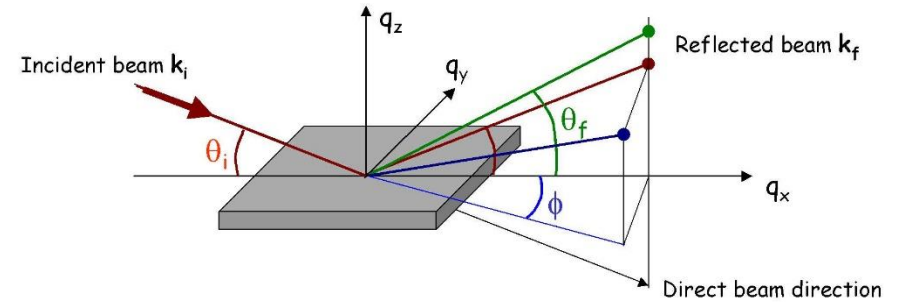
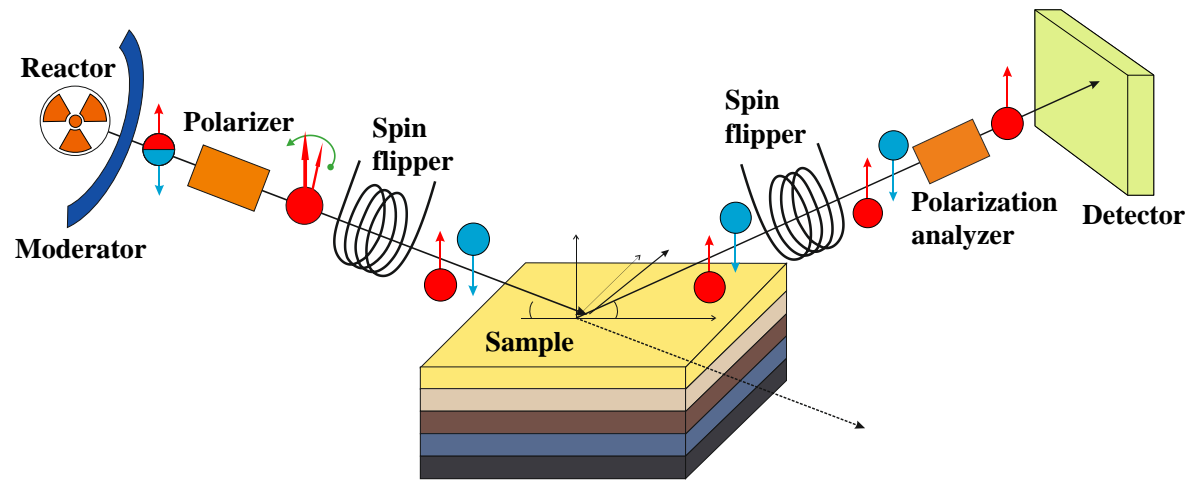


A.I. Buzdin, L.N. Bulaevski, Sov. Phys. JETP 94, 256-261 (1988)

Обратный эффект близости



Рефлектометрия поляризованных нейтронов



- **Рефлектометрия поляризованных нейтронов** → магнитный и ядерный профили слоистой структуры
- **GISANS** – неоднородности с характерным размером 1-1000 нм
- **Незеркальное рассеяние** – неоднородности с характерным размером 1-100 мкм

Неоднородности:

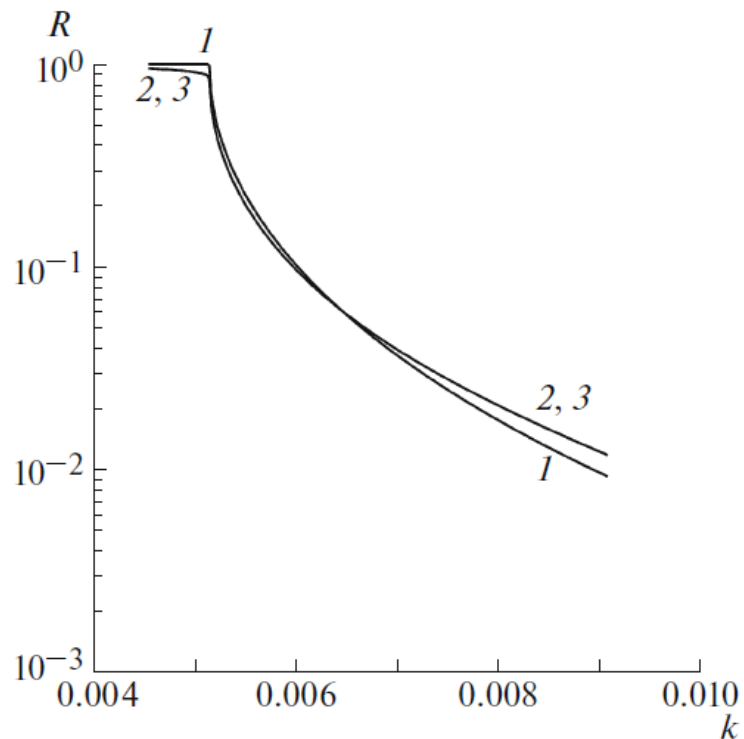
- Шероховатости межслойных границ
- Ферромагнитные домены и доменные стенки
- Ядерно-магнитные кластеры
- Сверхпроводящие и магнитные вихри

Модернизация спектрометра

- Тестирование и пуск в эксплуатацию нового широкоапертурного анализатора поляризации веерного типа (ПИЯФ) – V.G. Syromyatnikov et. al. // Journal of Physics: Conference Series 528 (2014) 012021
- Реализована защита детектора от фонового излучения, позволившая подавить фон нейтронов на порядок (ПИЯФ)
- Модернизация спектрометра в рамках проекта изотопно-идентифицирующей нейтронной рефлектометрии



Изотопно-идентифицирующая нейтронная рефлектометрия



- 1 – интерфейс вакуум/алюминий
- 2 – структура вакуум/ $\text{Al}+^{10}\text{B}(1\text{нм})//\text{Al}$
- 3 - структура вакуум/ $\text{Al}(20\text{нм})/\text{Al}+^{10}\text{B}(1\text{нм})//\text{Al}$

Yu.V.Nikitenko et al. Isotope-Identifying Neutron Reflectometry
// Crystallography reports, 2017, vol.60, No.4, pp. 466-479

Классическая нейтронная рефлектометрия не чувствительна к пространственному положению слоев.

В связи с этим необходимо развитие методики высоко-чувствительной к пространственному распределению в слоистой структуре различных изотопов, магнитных элементов и ядер со спином

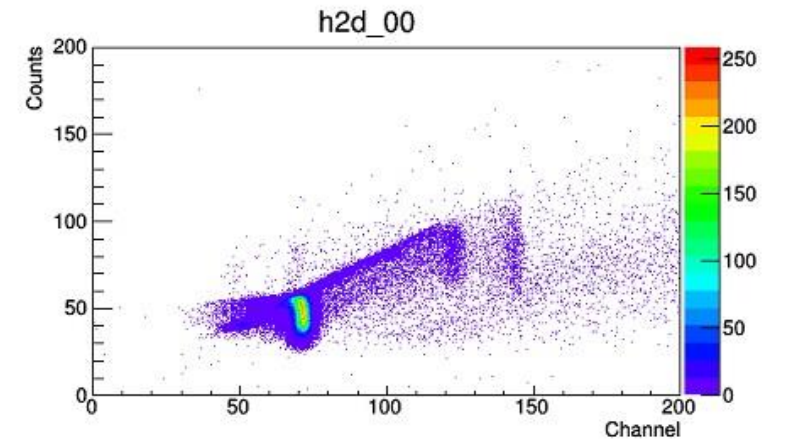
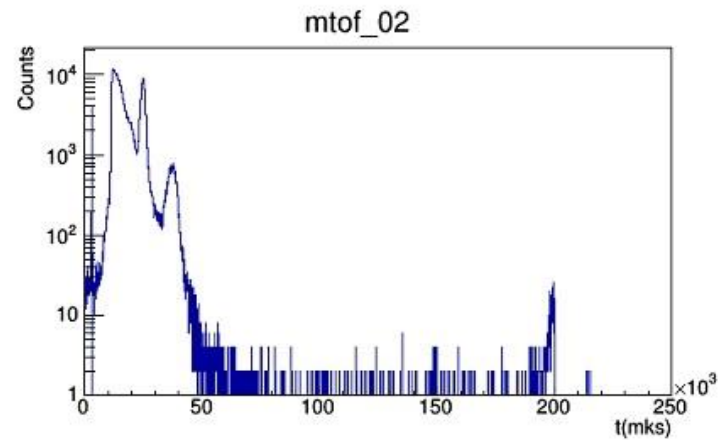
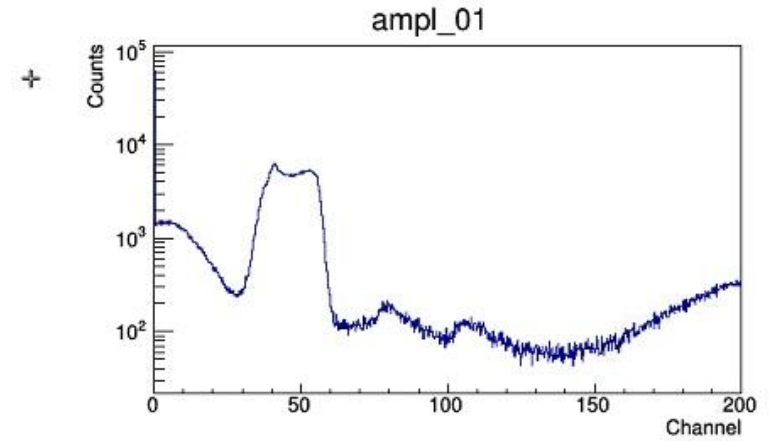
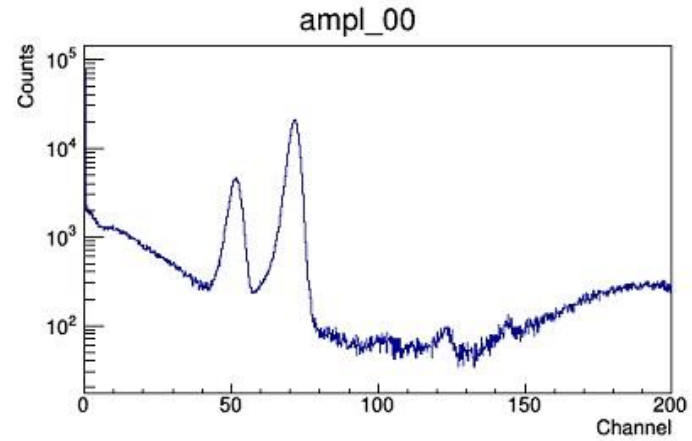
Разрабатываемая методика включает в себя:

- Реализацию в структуре режима стоячих волн или усиленных стоячих волн
- Одновременную регистрацию с нейтронами вторичного излучения
 - Заряженные частицы (α -частицы, тритоны)
 - γ -кванты
 - Нейтроны, изменившие спин при прохождении через магнитно-неколлинеарную среду

Изотопно-идентифицирующая нейтронная рефлектометрия



Ионизационная камера

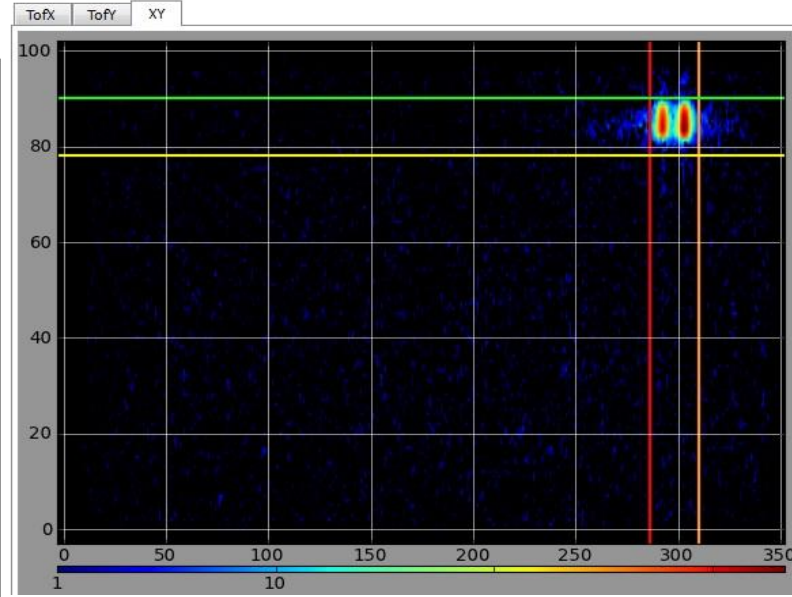
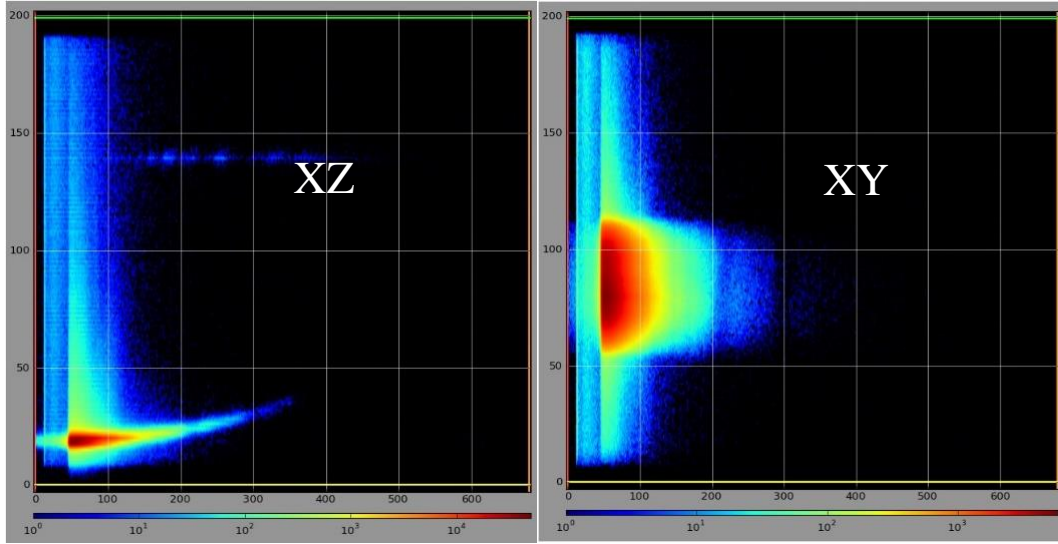


Спектр полученный на ионизационной камере на образце Cu(10nm)/V(55nm)/CoFe(5nm)/LiF(5nm)/V(15nm)//glass при угле скольжения нейтронного пучка 3 мрад

Дальнейшие планы по модернизации спектрометра:

- Реализация оборудования для рефлектометрических исследований в режиме наложения осциллирующего магнитного поля
- Разработка нового узла поляризации, с возможностью работы с поляризующим и неполяризующим зеркалами
- Разработка новых прерывателей
- Разработка кольцевого детектора и возможность одновременной регистрации отражения и рассеяния нейтронов
- Постановка задачи по приобретению нового криостата с возможностью получения $T < 1.5\text{K}$ и регистрацией рассеяния нейтронов

Примеры спектров



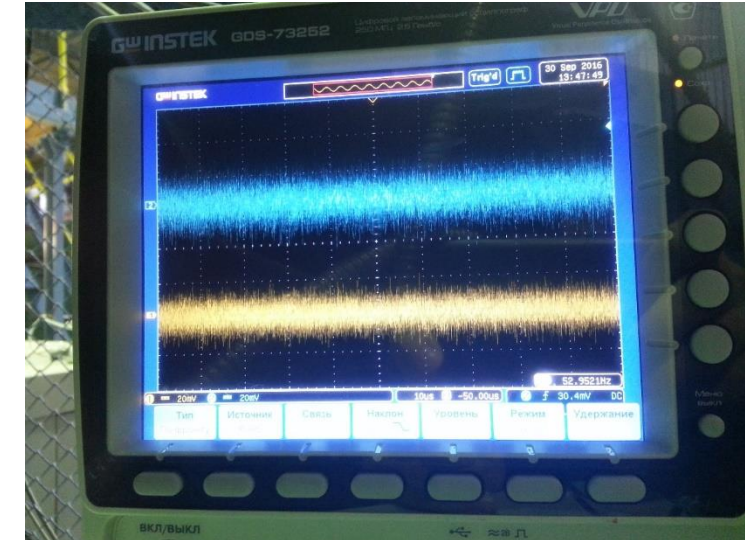
Пространственное распределение

Два режима:

- 1) Расстояние образец-детектора – 4940 мм -> -> для измерения коэф. отражения
- 2) Расстояние образец-детектор – 640 мм -> -> для измерения рассеяния

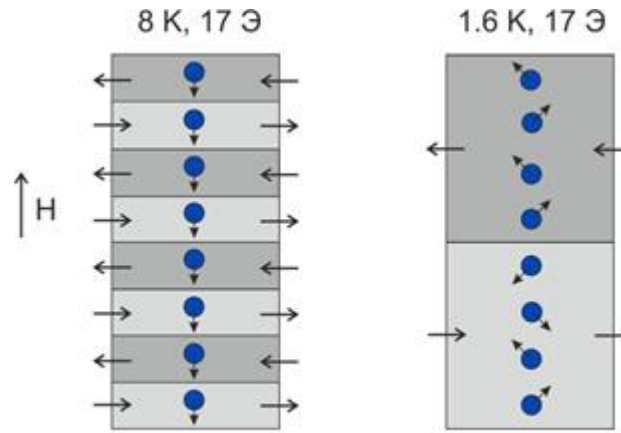
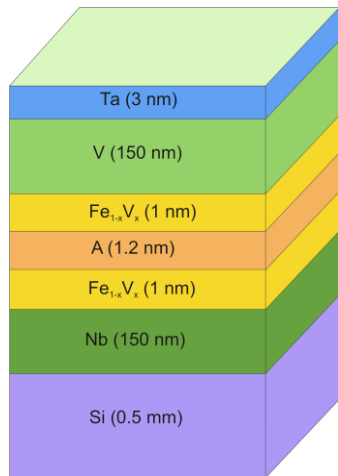


экран



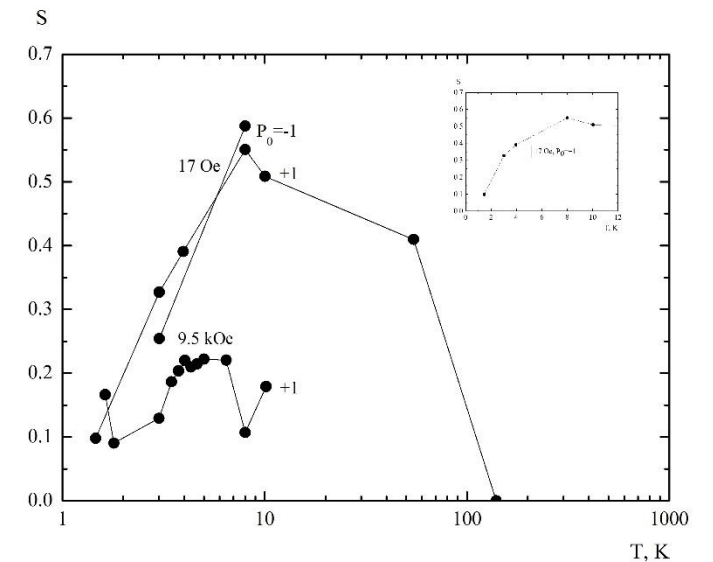
Сосуществование сверхпроводимости и ферромагнетизма в слоистых структурах

Исследование структур V/FeV/Nb



Магнитное состояние структуры

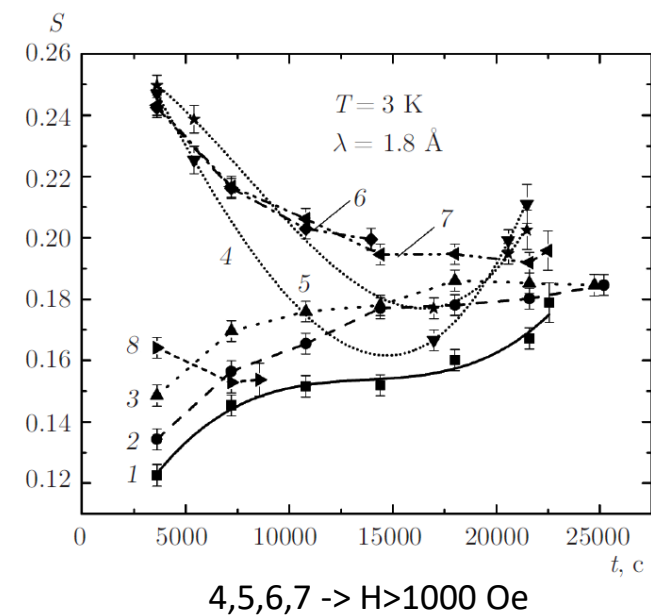
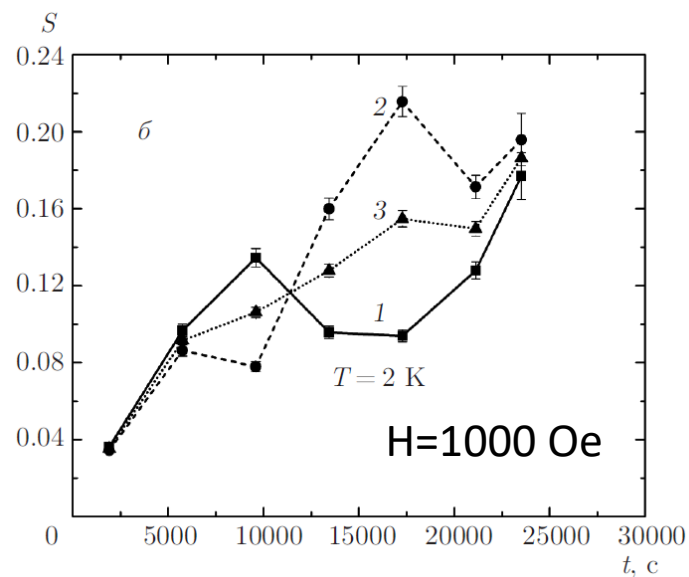
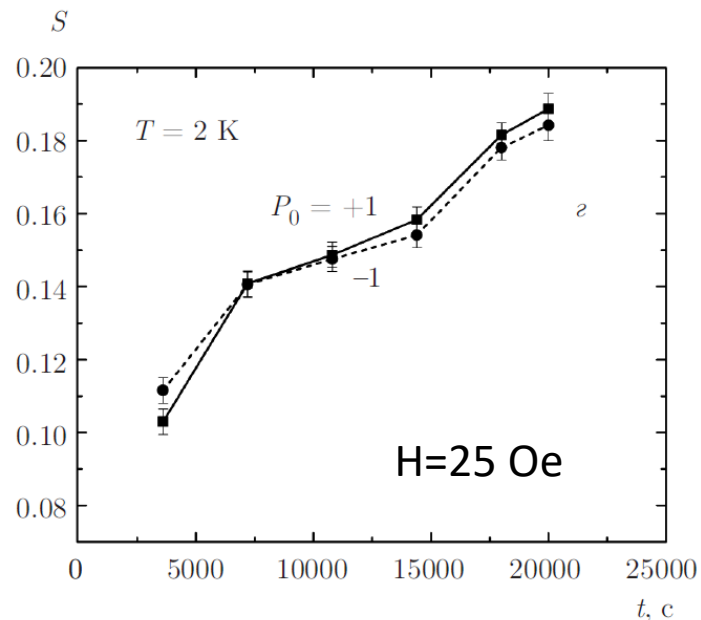
- При $T=150-300$ К в структуре присутствуют ферромагнитные кластеры
- При T ниже 150К появляются ферромагнитные домены
- Доменная структура модифицируется под влиянием сверхпроводимости



Рассеяние нейтронов

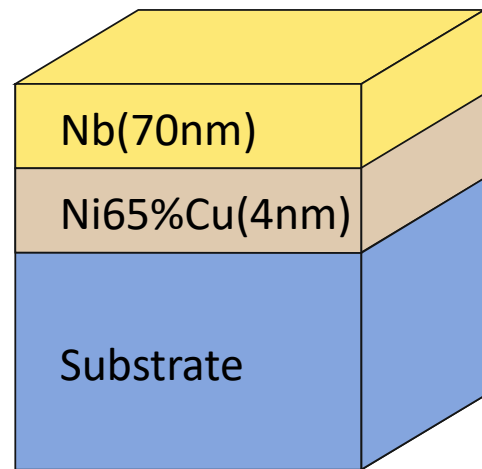
Сосуществование сверхпроводимости и ферромагнетизма в слоистых структурах

Релаксация магнитного состояния



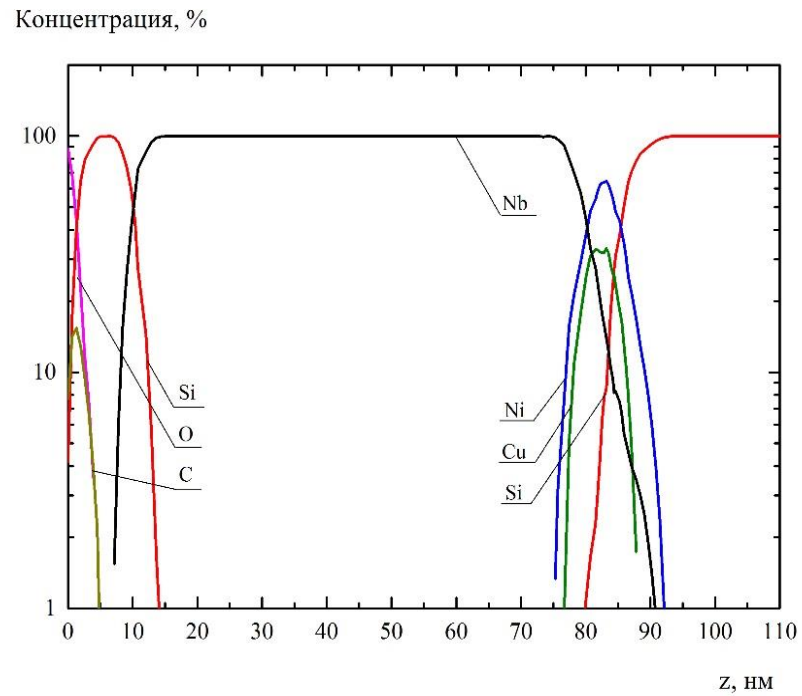
- Рост рассеяния из-за роста плотности доменных стенок (рис.1, 2)
- Изменение поляризации из-за изменения направления магнитного момента кластеров (рис.1, 2)
- Сверхпроводящие вихри при высоком наложенном на образец магнитном поле (рис.3)

Следующая идея

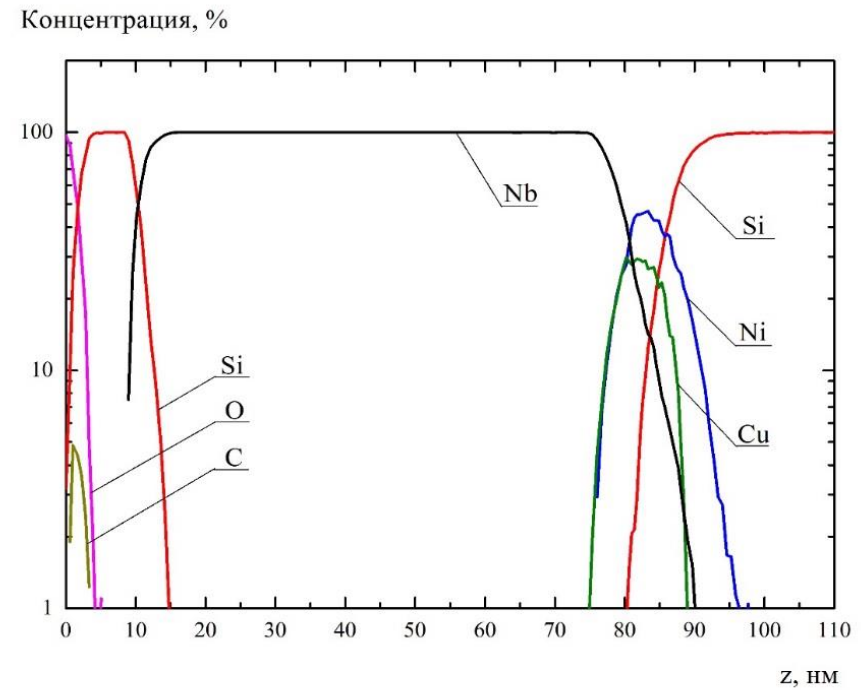


- T_{curie} Ni меньше, чем Fe -> возможно сделать FM слой толще
 $d_{\text{FM}} \sim 1/T_{\text{curie}}$

Вторичная нейтральная масс-спектрометрия



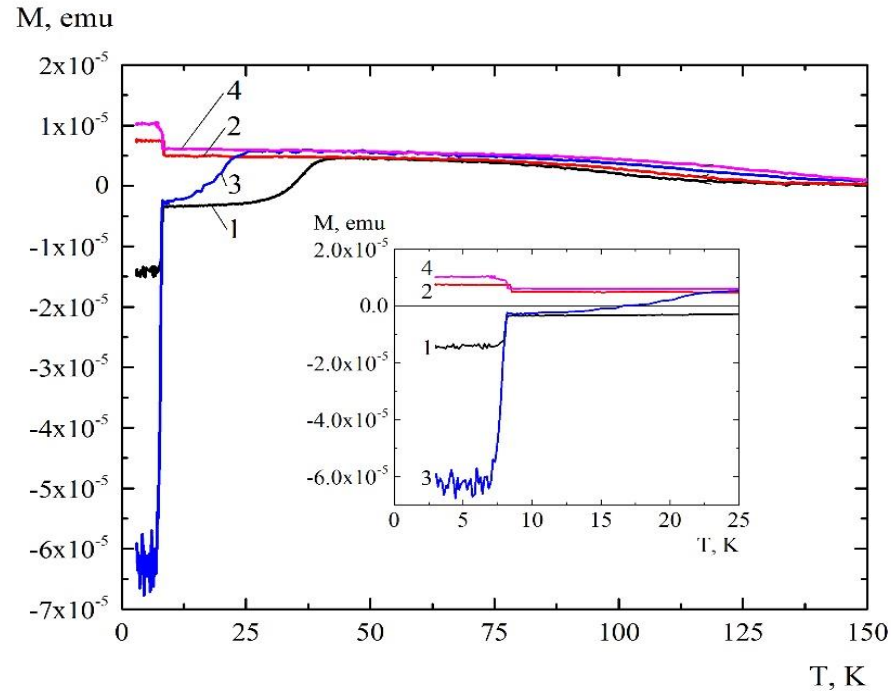
9 месяцев после изготовления структуры



15 месяцев спустя

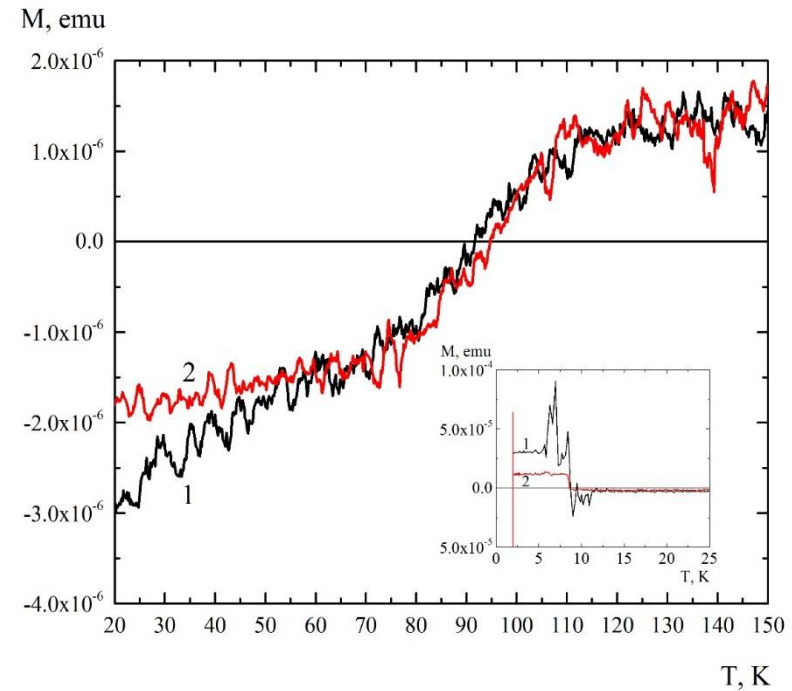
- Профили Ni и Cu уширяются со временем
- Диффузия в сторону Nb
- Диффузия Cu быстрее

Данные магнитометрии



3 месяца после изготовления

- 1 – ZFC
- 2 – FC, 200e
- 3 – ZFC
- 4 – FC, 100 Oe

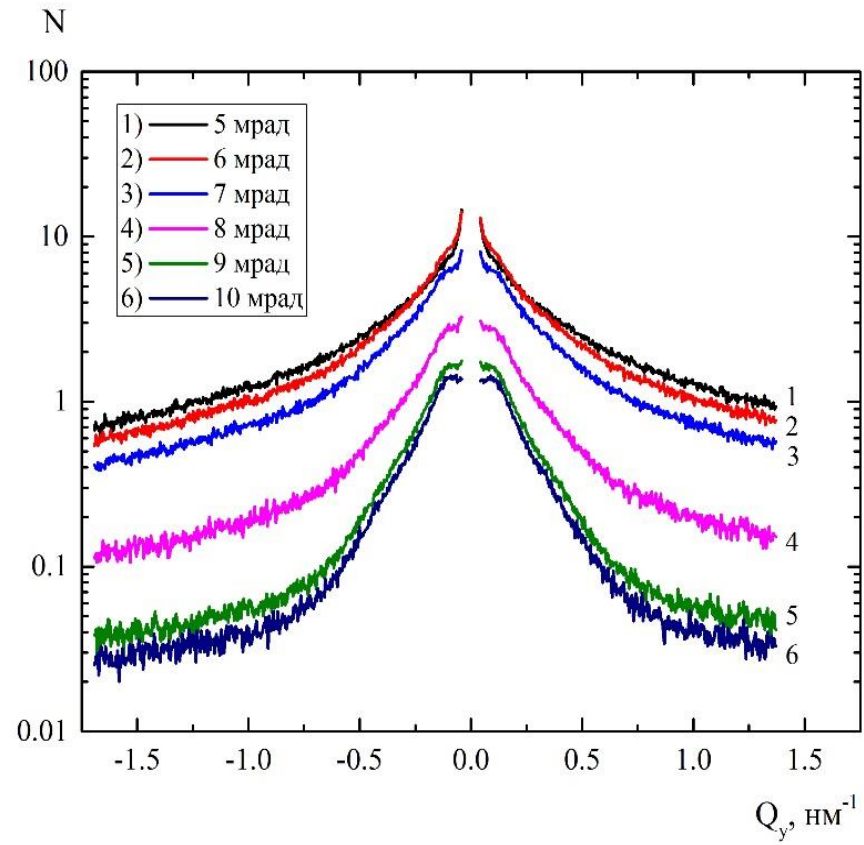


7 месяцев спустя

- 1 – ZFC
- 2 – FC, 200e

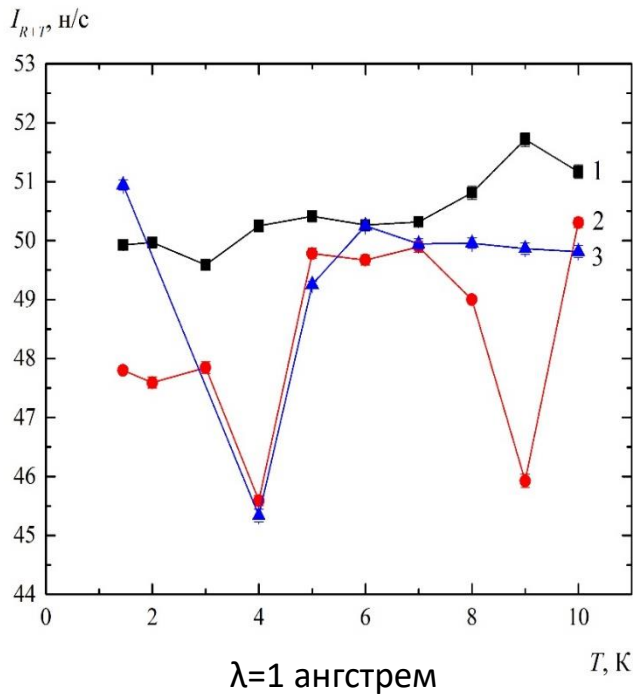
- Переход в сверхпроводящее состояние при $T=8.2$ K ($T=8.8$ K после изготовления)
- Изменение температуры блокировки от $T=40$ K ($H=20$ Э) до $T=25$ K ($H=100$ Э), позже от $T=53$ K ($H=20$ Э)
- $M=3.8$ kG при $H=2$ kOe

GISAXS



- $D=21 \text{ nm}$ -> радиус неоднородностей

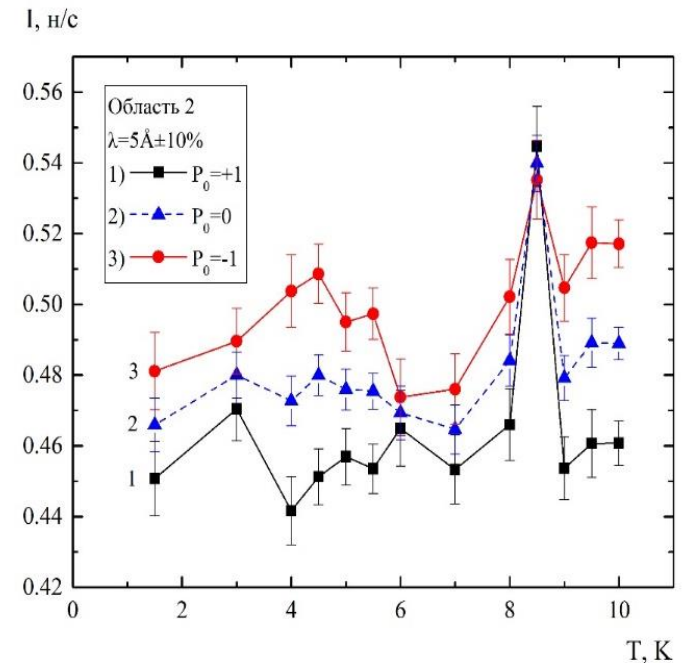
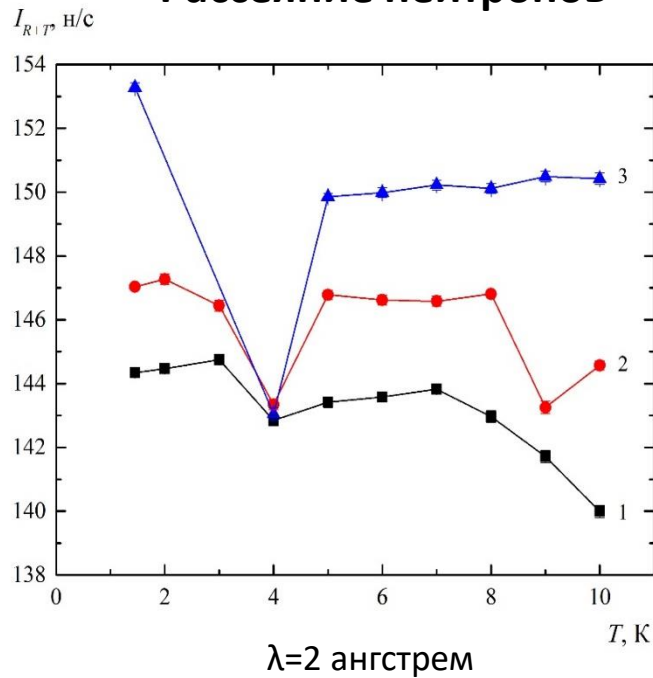
Рассеяние нейтронов



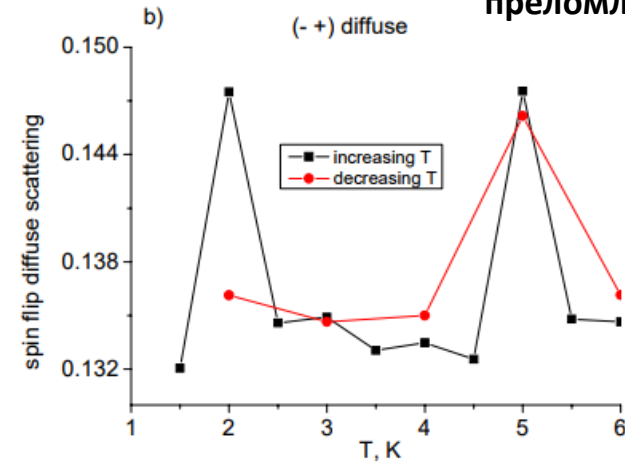
Интенсивность канала отражение + преломление

- 1 – 25 Э
- 2 – 25 Э (образец намагничен)
- 3 – 200 Э

- При $N=25 \text{ Э}$ рассеяние максимально, а при $N=200 \text{ Э}$ наименьшее
- Максимум рассеяния при 4К
- Антикорреляция в поведении для различных входных поляризаций (рис.3) → рассеяние на кластерах



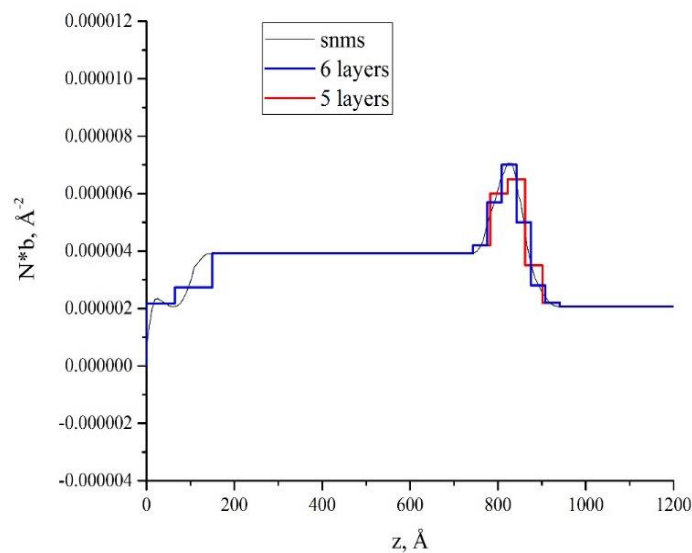
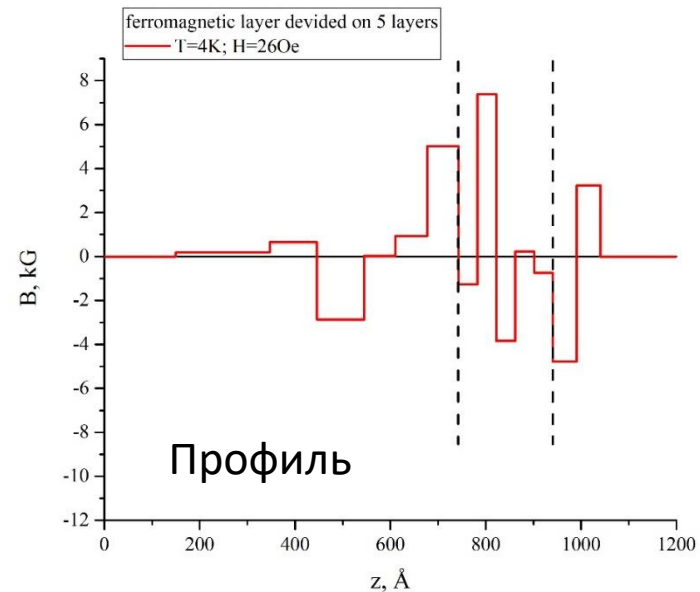
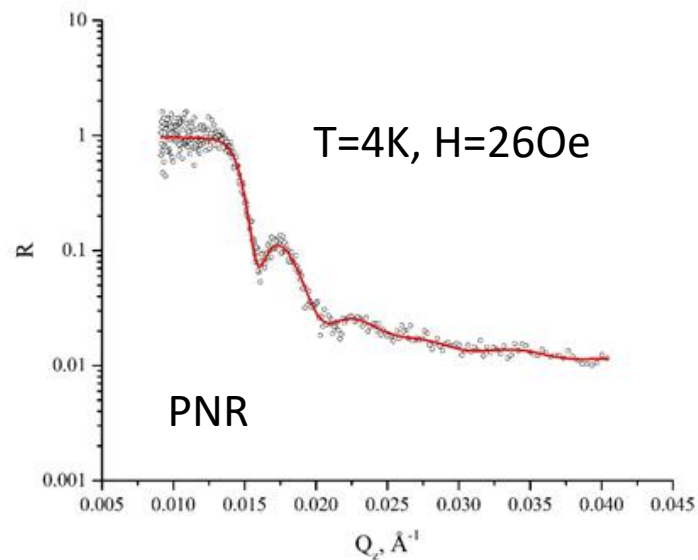
Интенсивность вне канала отражение + преломление



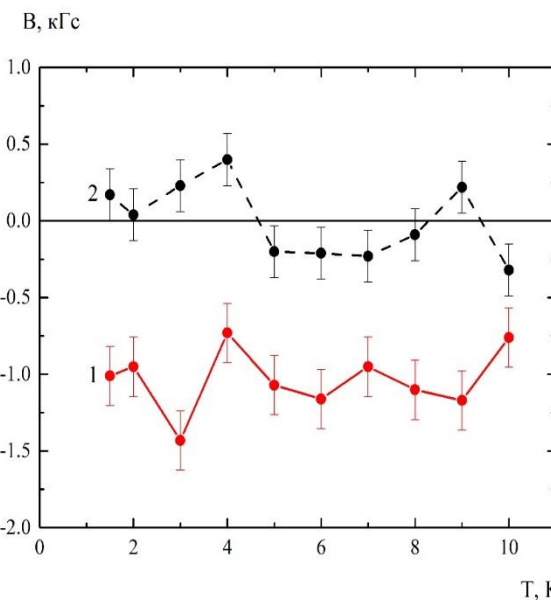
Структура: Cu(32нм)/V(40нм)/Fe(1нм)/MgO(001)

V.L. Aksenov, Yu.N. Khaidukov, Yu.V. Nikitenko, Journal of Physics: Conference Series 211, 012022 (2010)

Reflectivity

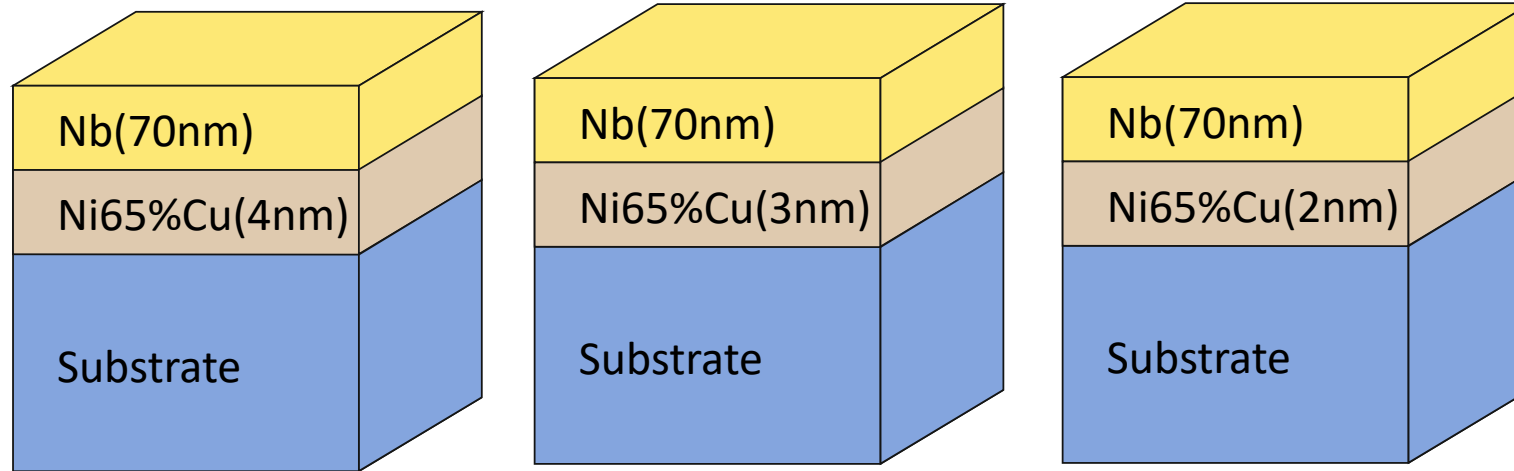


- Высокая локальная намагниченность
- Большие изменения намагниченности по глубине структуры
- Требуется дальнейший анализ



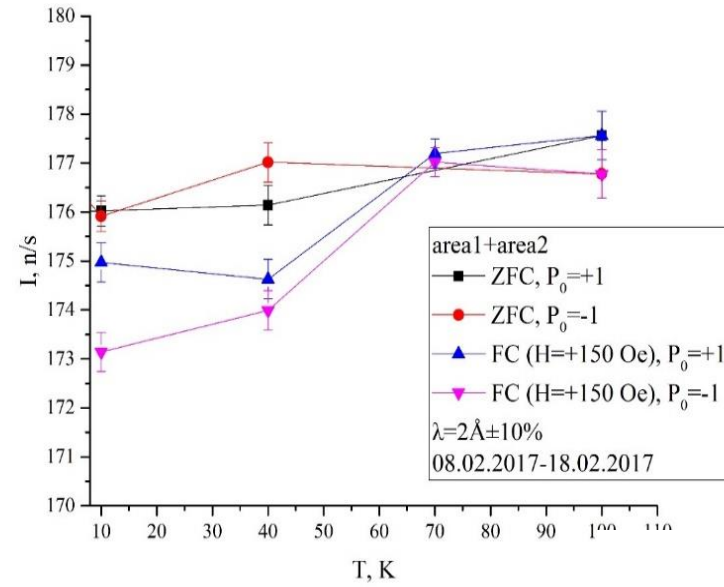
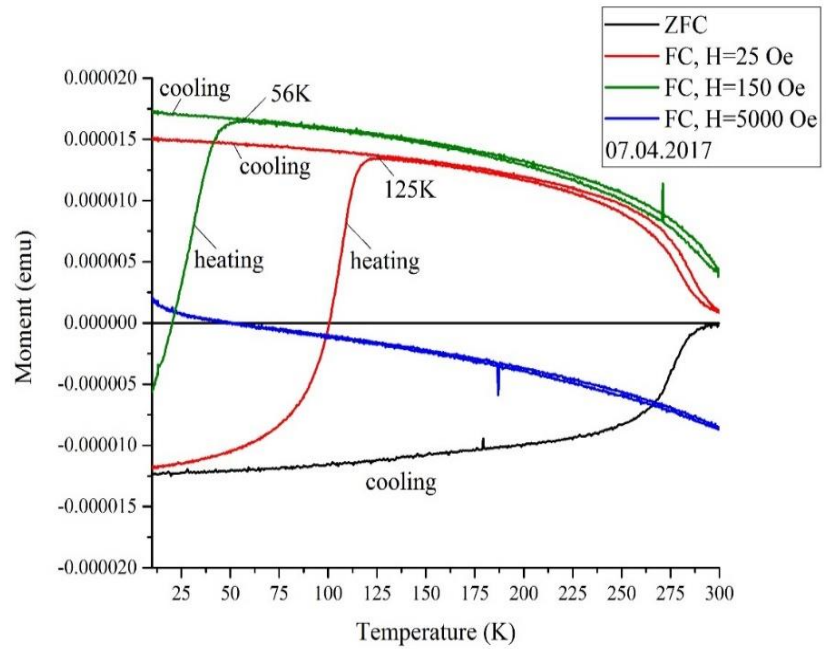
Проекция на направление магнитного поля индукции магнитного поля в ферромагнитном (1) и сверхпроводящем (2) слоях в состоянии №2.

Следующая идея

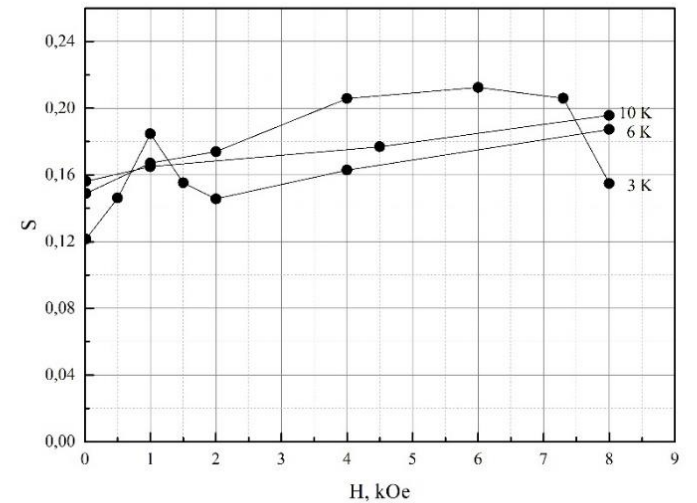


- Сделать слой более тонким -> уменьшить обменное взаимодействие
- Из-за технической ошибки Ni - 80%
- Поэтому реально второй образец Ni80%Cu20% (6.5 нм) (обменное взаимодействие выше, чем в ранее исследованном образце)

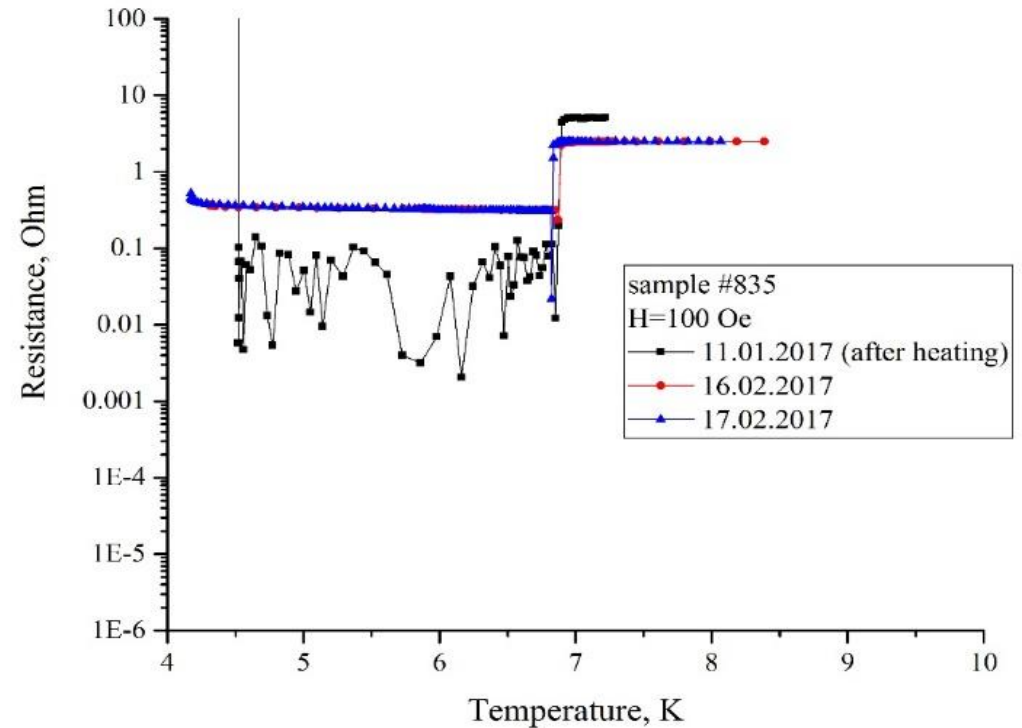
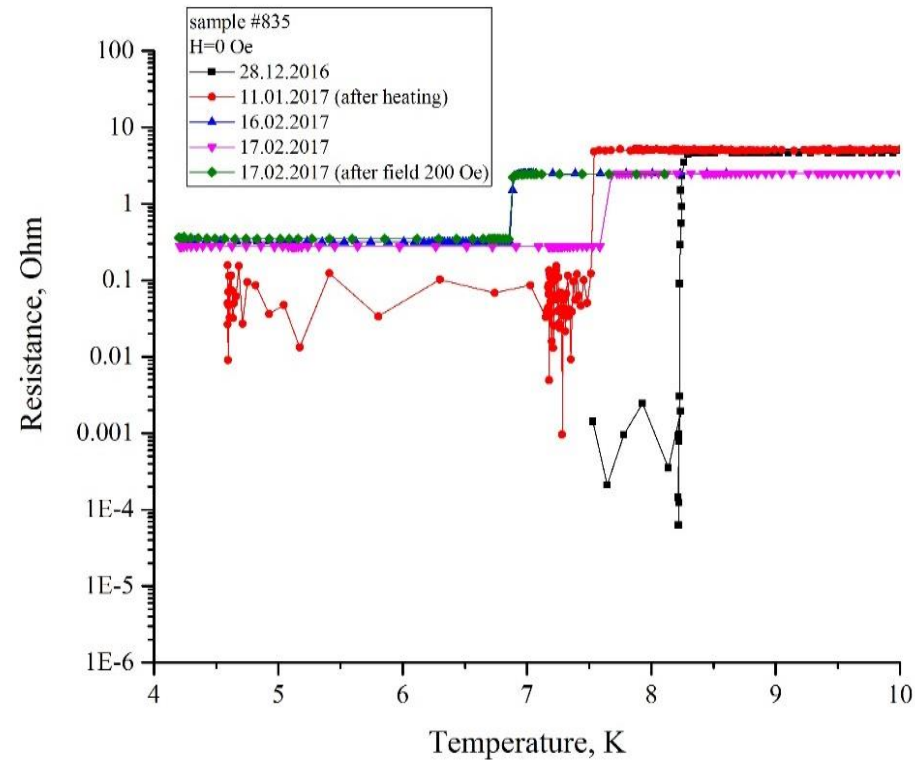
Эффективность PNR



- Возможно определять температуру блокировки, H_{c1} , H_{c2} , T_c



Электрическое сопротивление



- T_c уменьшается со временем
- Фактор эл. сопротивления также уменьшается -> увеличение толщины магнитного слоя
- Время и магнитное поле приводят к уменьшению T_c и уменьшению коэффициента спада сопротивления

Заключение

- Образцы являются неоднородными (присутствуют кластеры), меняются со временем, имеет место временная релаксация магнитного состояния, возникают сверхпроводящие вихри
- Для структуры Nb/Ni65%Cu35%(6.5нм) показан фазовый переход при $T=9\text{K}$ и $T=4\text{K}$.
- Показана эффективность методики для исследования в том числе различных характерных точек (температура блокировки, H_{c1} , H_{c2} , T_c)
- Дальнейшие планы: получение слоистых структур NiCu/Nb и FeV/Nb с различными долями Cu, V и различными толщинами. Исследование образцов с помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов и GISANS на предмет реализации криптоферромагнитного состояния в структурах, обратного эффекта близости, спин-триплетного состояния в диапазонах температуры 1.5-9 K и магнитного поля 20 Э-200 Э
- Рассматривается возможность получения тонких плёнок **UCoGe**, **URhGe**, **UGe₂**

Спасибо за внимание