

# **Горизонты физики**

## *Теоретические проекты*

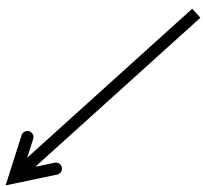
Бобков Григорий

*Кафедра фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур*

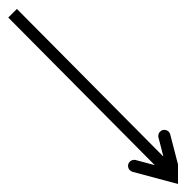
# В двух словах о нашей области науки

## Лаборатория спиновых явлений в сверхпроводящих системах

Магнетизм + Сверхпроводимость



Микромагнитной  
моделирование  
(Уравнение LLG)



Микроскопическая теория  
сверхпроводимости  
(Уравнения BdG и Горькова)

### Актуальность:

#### Для инженеров:

Новые устройства для  
электроники с меньшими  
потерями и большими частотами

#### Для физиков:

Новая интересная  
мезоскопическая физика на  
интерфейсах, поверхностях и  
нетривиальных топологических  
структурах

# Проекты

- Микромагнитное моделирование (*численное*)
- Исследование магнитной динамики (*аналитическое*)
- Исследование сверхпроводящих гетероструктур (*численное, нужно знание квантовой механики*)

# **Микромагнитное моделирование**

# Чем мы будем заниматься

**Самостоятельно писать программы для описания динамики намагниченности в различных системах. (Численное решение уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта)**

- Изучение структуры рассеянных полей
- Динамика однородной намагниченности (ферромагнитный резонанс)
- Движение доменных стенок магнитным полем.
- Изучение стабильной (метастабильной) конфигурации намагниченности в различных системах
- Распространение спиновых волн

# Что лежит в основе

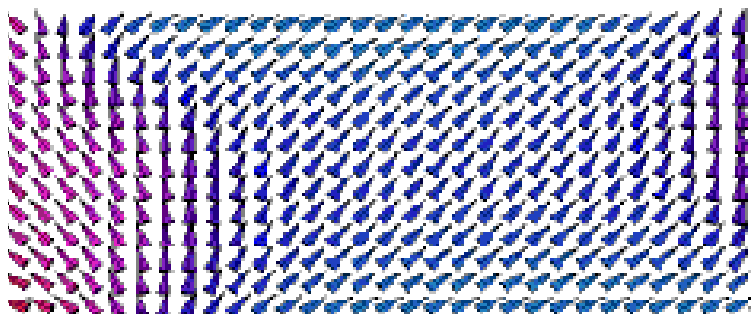
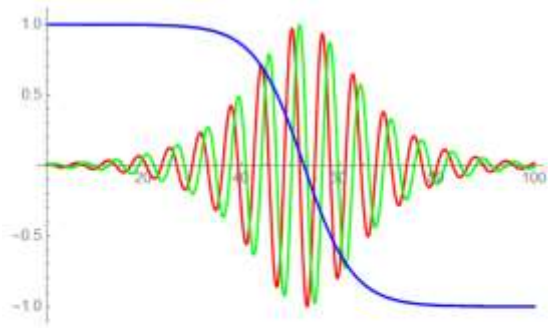
- ☉ Каждый атом обладает собственным моментом импульса – спином  $\frac{\hbar}{2}$
- ☉ Магнитный момент атома пропорционален моменту импульса  $M = -\gamma \frac{\hbar}{2}$
- ☉ Магнитное поле оказывает момент сил на магнитный момент  $M \times H$

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}$$

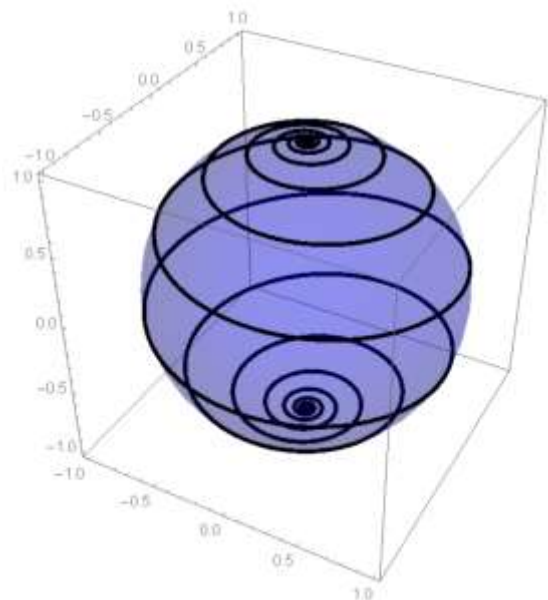
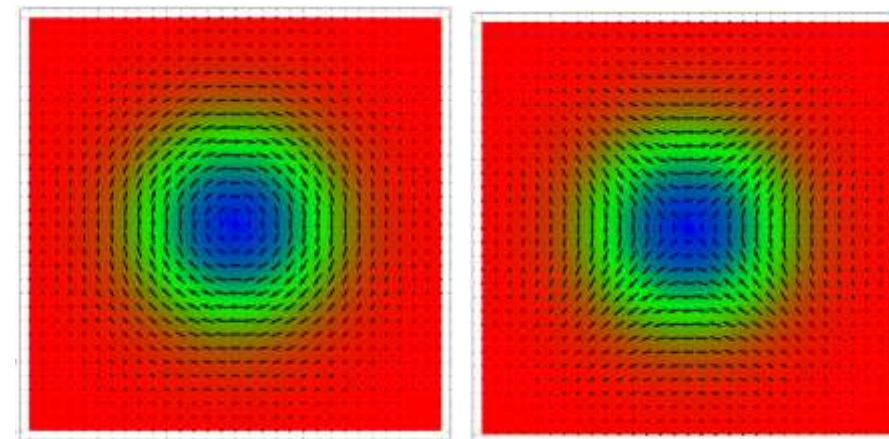
$H_{eff}$  - эффективное поле, складывающееся из всего, что есть в системе:  
обменное поле, поле анизотропии, внешнее поле, поле рассеянных полей и т.д.

# Примеры исследуемых задач

Спиновые волны в пленке

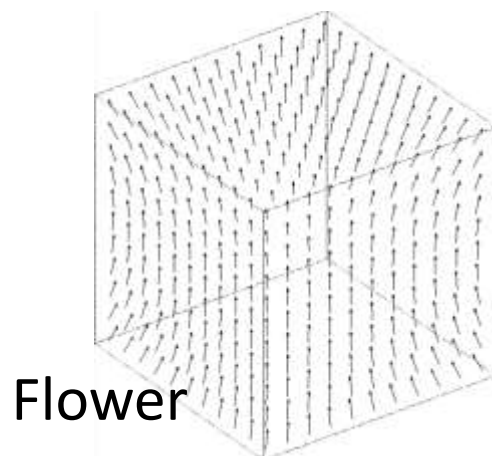


Топологически нетривиальные структуры

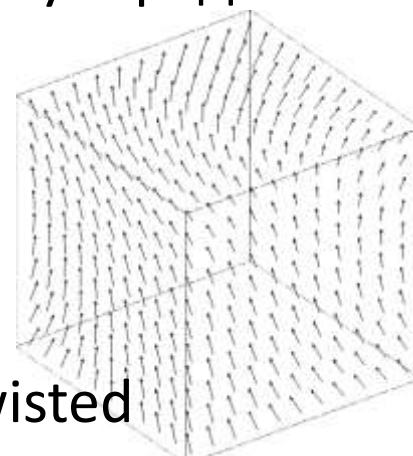


Переворот однородной намагниченности полем

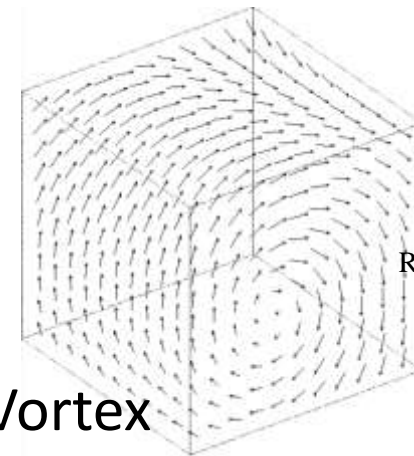
Различные упорядочения намагниченности в кубе



Flower



Twisted



Vortex

# **Аналитическое исследование магнитной динамики**



# Что лежит в основе

- ☉ Каждый атом обладает собственным моментом импульса – спином  $\frac{\hbar}{2}$
- ☉ Магнитный момент атома пропорционален моменту импульса  $M = -\gamma \frac{\hbar}{2}$
- ☉ Магнитное поле оказывает момент сил на магнитный момент  $M \times H$

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}$$

$H_{eff}$  - эффективное поле, складывающееся из всего, что есть в системе:  
обменное поле, поле анизотропии, внешнее поле, поле рассеянных полей и т.д.

# Примеры задач

- Исследование ферромагнитного резонанса и нахождение моды Киттеля.
- Исследование одномерных магнитных текстур – доменных стенок: равновесной формы, а также динамики.
- Исследование топологически нетривиальных структур двумерных ферромагнетиков – скирмионов.

Также предполагается сравнение полученных результатов с реальными экспериментами.

(А также с численными результатами ваших товарищей выполняющих предыдущий проект)

**Описание гетероструктур  
сверхпроводник/магнетик с помощью  
уравнений Боголюбова де Женна**

# О чем этот проект

Уравнения Боголюбова де Женна

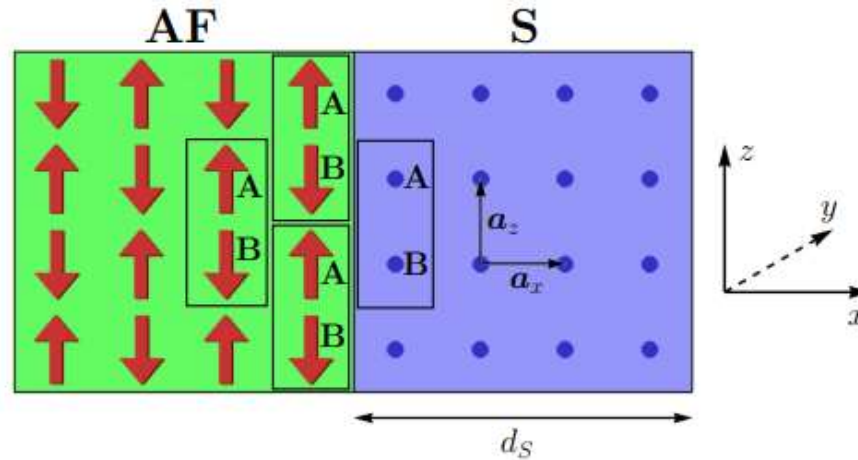
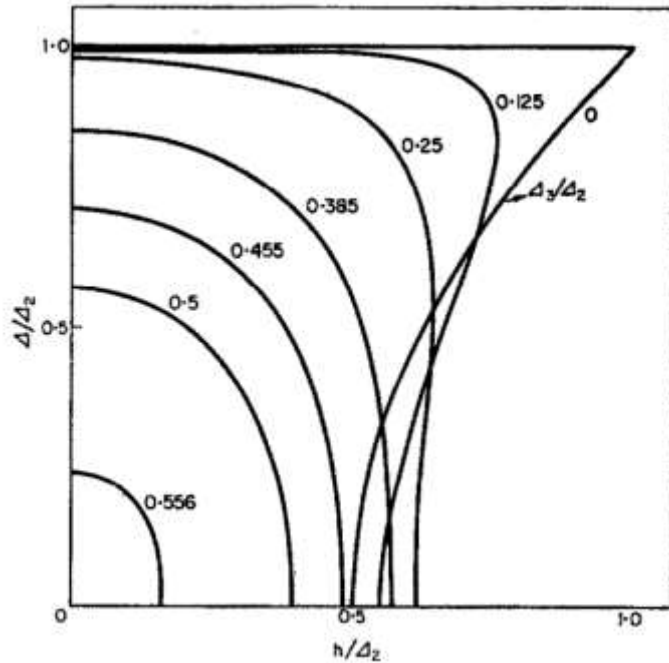
$$-\mu u_{n,\sigma}^i - t \sum u_{n,\sigma}^j + \sigma \Delta_i v_{n,-\sigma}^i + (\mathbf{m}_i \boldsymbol{\sigma})_{\sigma\alpha} u_{n,\alpha}^i = \epsilon_n u_{n,\sigma}^i$$

$$-\mu v_{n,\sigma}^i - t \sum v_{n,\sigma}^j + \sigma \Delta_i^* u_{n,-\sigma}^i + (\mathbf{m}_i \boldsymbol{\sigma}^*)_{\sigma\alpha} v_{n,\alpha}^i = -\epsilon_n v_{n,\sigma}^i$$

Бислойная наноструктура



Основной изучаемый параметр:  
критическая температура  
сверхпроводника



- Ферромагнетик
- Антиферромагнетик
- Ферримагнетик
- Alter-магнетик

Без знания квантовой механики смысла проекта  
НЕ ПОНЯТЬ!

# Проекты

- Микромагнитное моделирование (*численное*)
- Исследование магнитной динамики (*аналитическое*)
- Исследование сверхпроводящих гетероструктур (*численное, нужно знание квантовой механики*)

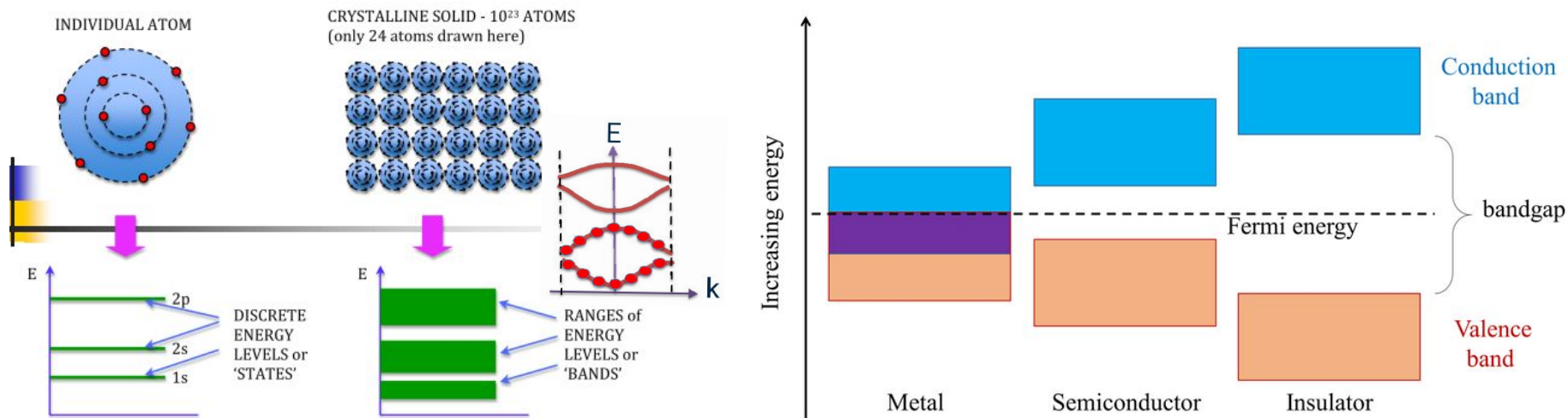
# Горизонты физики

## Электронно-транспортные свойства магнитных топологических изоляторов

*Наумов М.А., аспирант ВНИИА*

*Лаборатория фотоэлектронной спектроскопии квантовых функциональных материалов МФТИ*

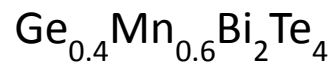
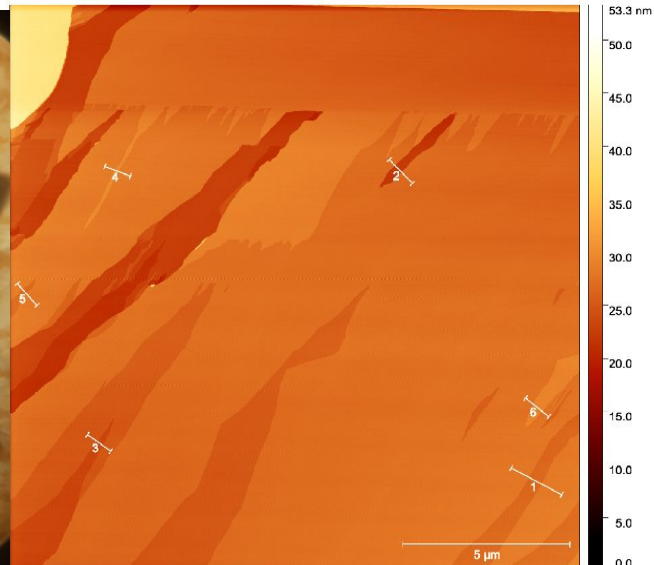
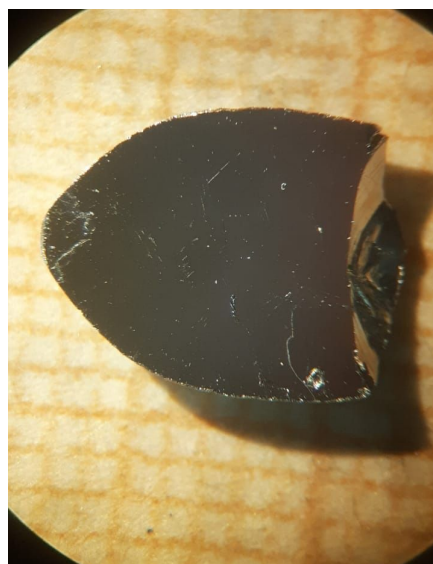
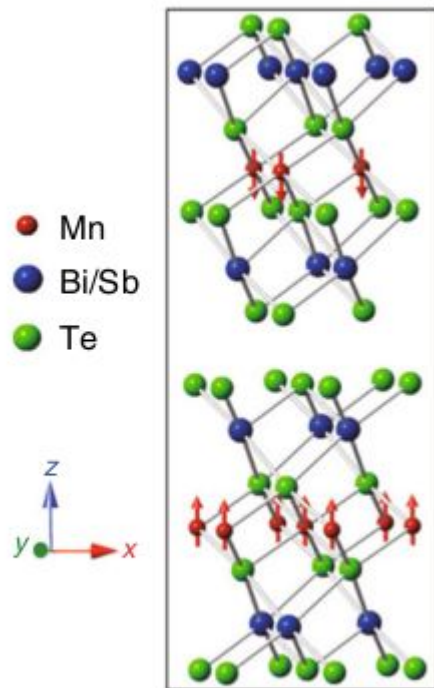
# Введение. Энергетические зоны в твердом теле



# Структура материала $\text{Mn}_y\text{Ge}_{1-y}(\text{Sb}_x\text{Bi}_{1-x})_2\text{Te}_4$

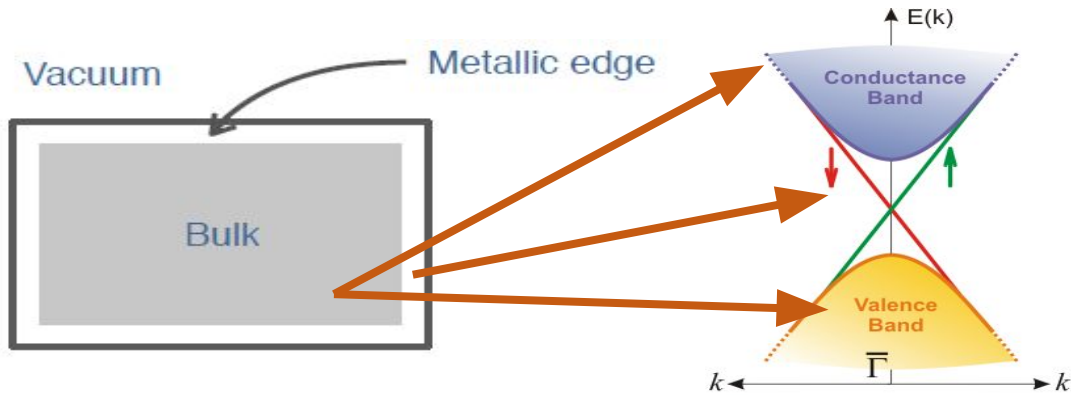
Монокристалл  
л  
в оптическом  
микроскопе...

...и в атомно-  
силовом  
микроскопе

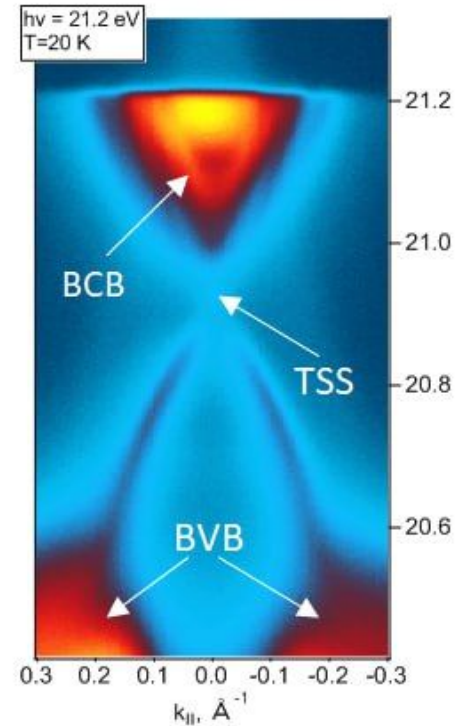




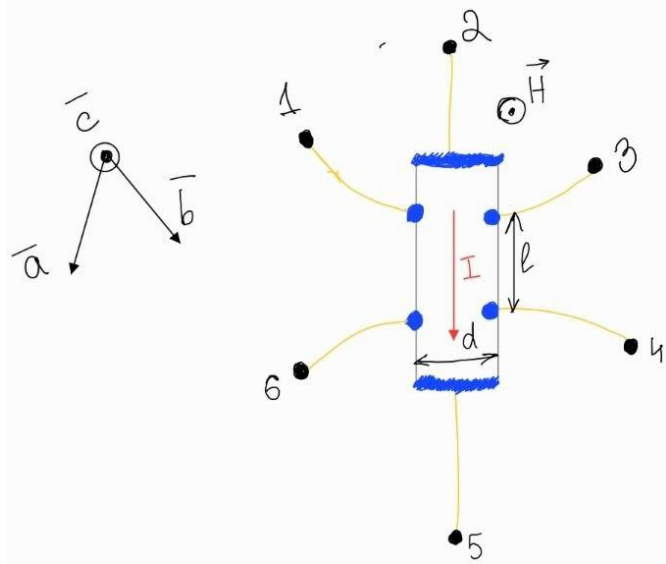
# Свойства топологических изоляторов



- Линейный закон дисперсии  
→  $m^*=0$
- Спиновая поляризация состояний
- «Spin-momentum locking»
- Устойчивы к возмущениям!



# Про транспортные свойства материалов



$$\varepsilon(\mathbf{p}) = \frac{p_x^2}{2m_x} + \frac{p_y^2}{2m_y} + \frac{p_z^2}{2m_z}.$$



$$\mathbf{E} = \hat{\rho} \mathbf{j}$$

$$\hat{\rho}(\mathbf{B}) = \frac{1}{en} \begin{pmatrix} \mu_{\parallel}^{-1} & -B & 0 \\ B & \mu_{\parallel}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{\perp}^{-1} \end{pmatrix};$$

# Установка для исследования транспортных свойств и задачи

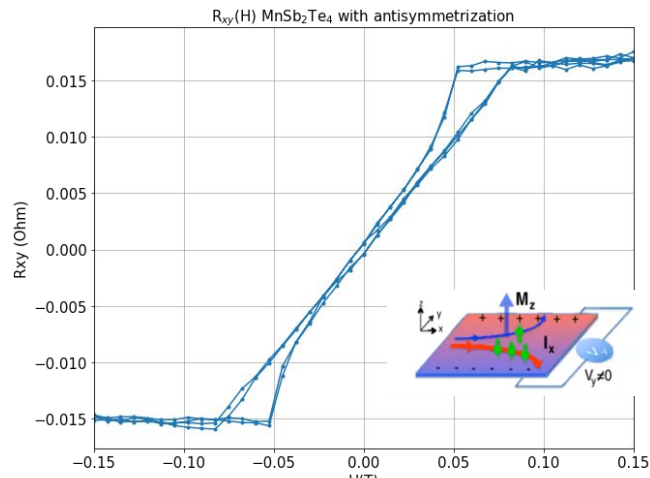
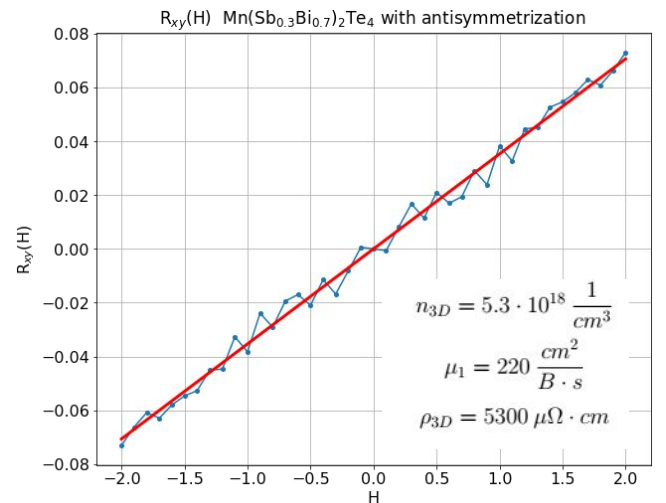
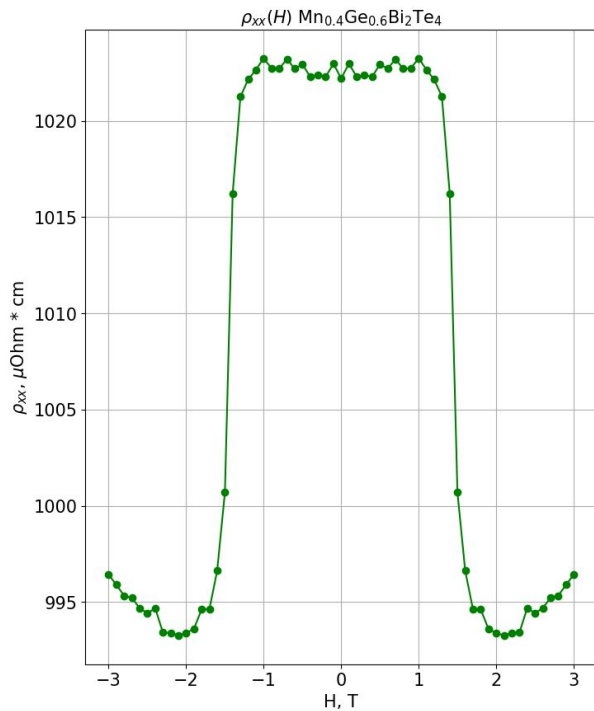
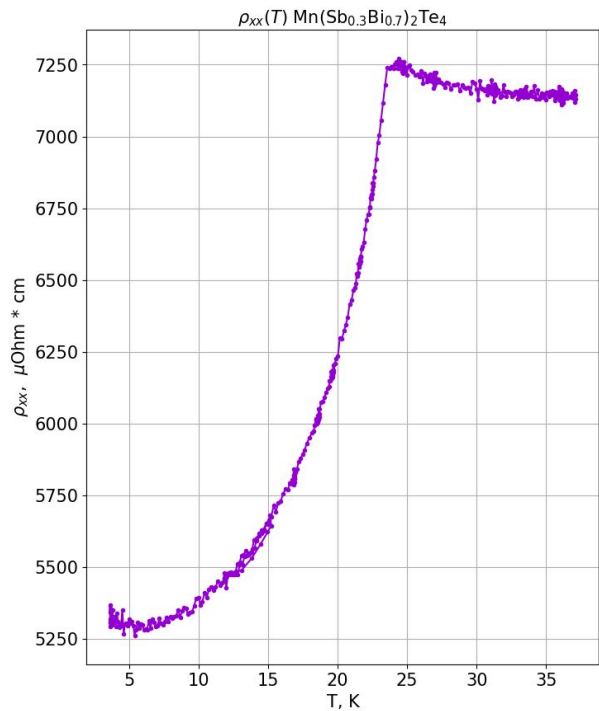
Attocube AttoDry1000

Задачи в ходе проекта:

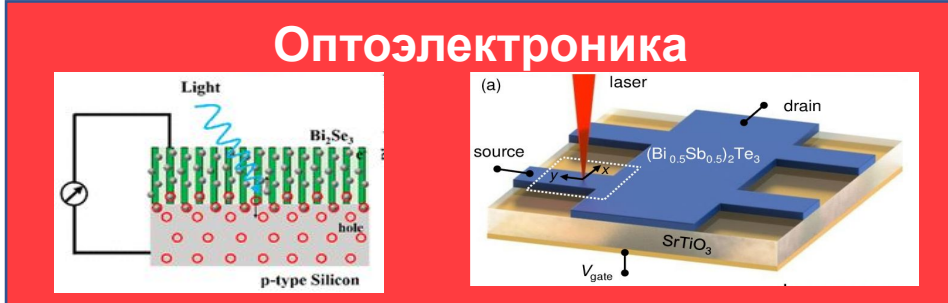
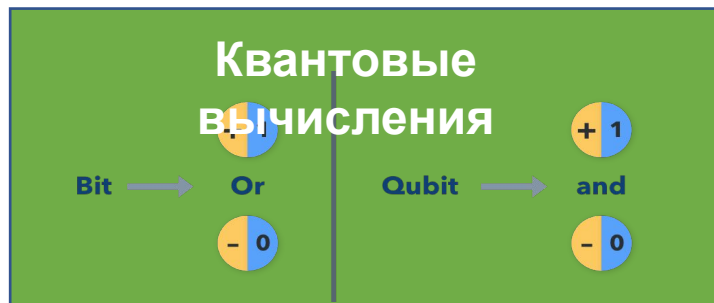
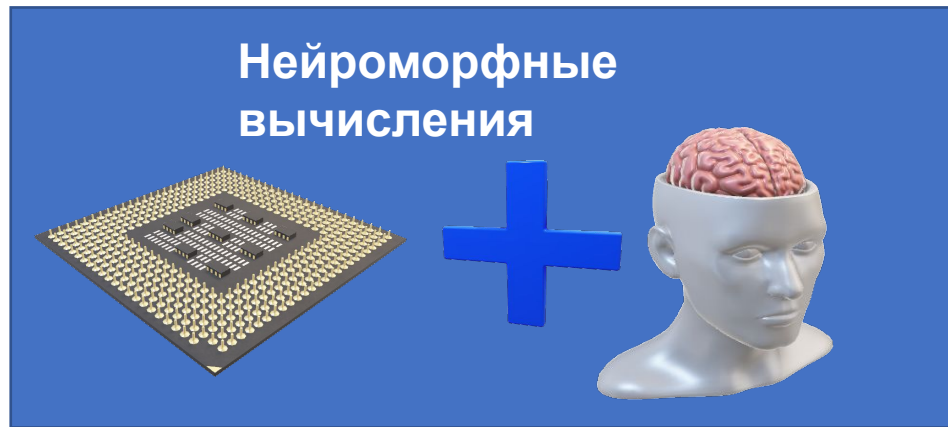
- Подготовка кристаллов
- Создание контактов к образцам
- Измерения на установке AttoDry1000, при температурах до 3.7 К и магнитных полях до 5Т
- Анализ полученных данных



# Результаты измерений



# Зачем это нужно?



# Горизонты физики

*Изучение магнитных свойств  
пермаллоя при помощи ФМР  
спектроскопии*

Тюменев Радик

[tiumenev.r@phystech.edu](mailto:tiumenev.r@phystech.edu)

Полевой Константин

[polevoy.kb@phystech.edu](mailto:polevoy.kb@phystech.edu)

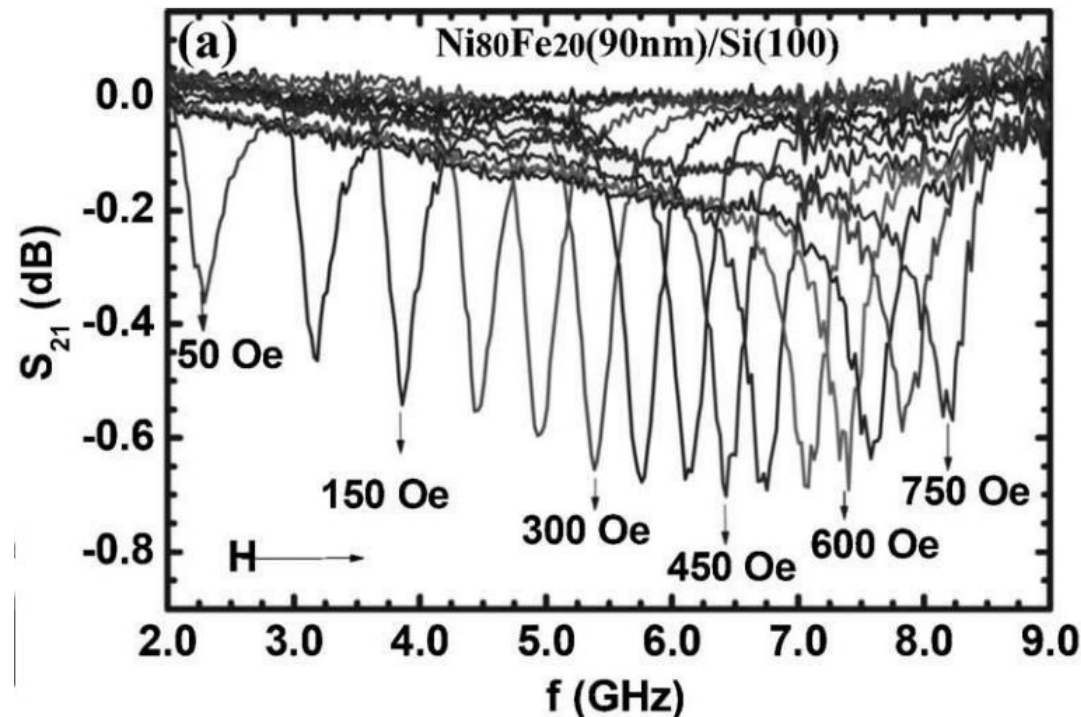
Калашников Дмитрий

[kalashnikov.ds@phystech.edu](mailto:kalashnikov.ds@phystech.edu)

*Кафедра фундаментальной и прикладной физики микро- и наноструктур*

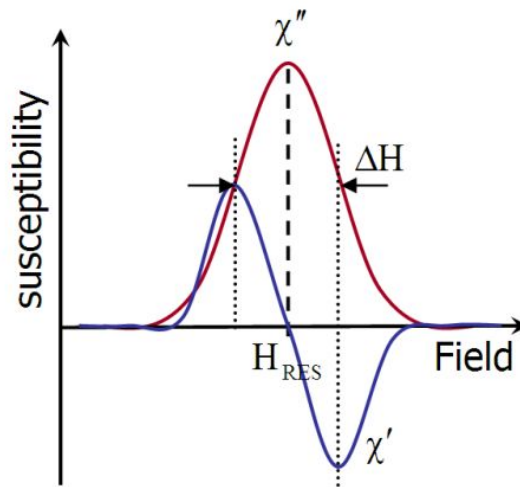
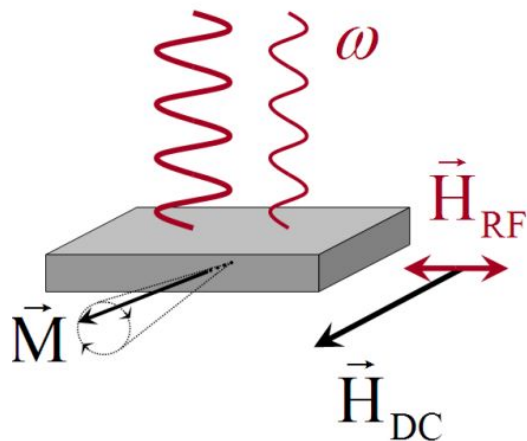
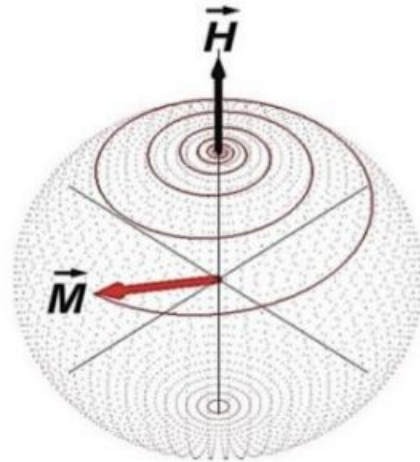
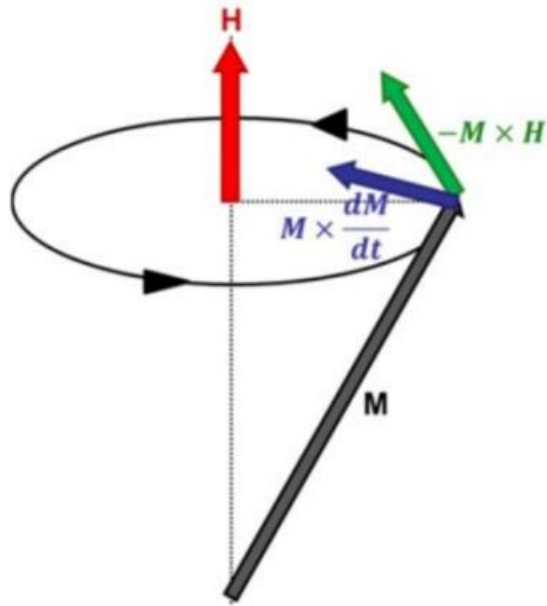
# Что такое ФМР спектроскопия?

- **Ферромагнитный резонанс**, или **ФМР**, представляет собой связь между электромагнитной волной и намагниченностью среды, через которую она проходит. Это взаимодействие приводит к значительной потере мощности волны.
- Спектроскопический метод ФМР используется для определения энергетических констант в гамильтониане ферромагнетика.



\*Chen et al., J. Appl. Phys. 101, 09C104 2007

# ОСНОВЫ ФМР



Уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта:

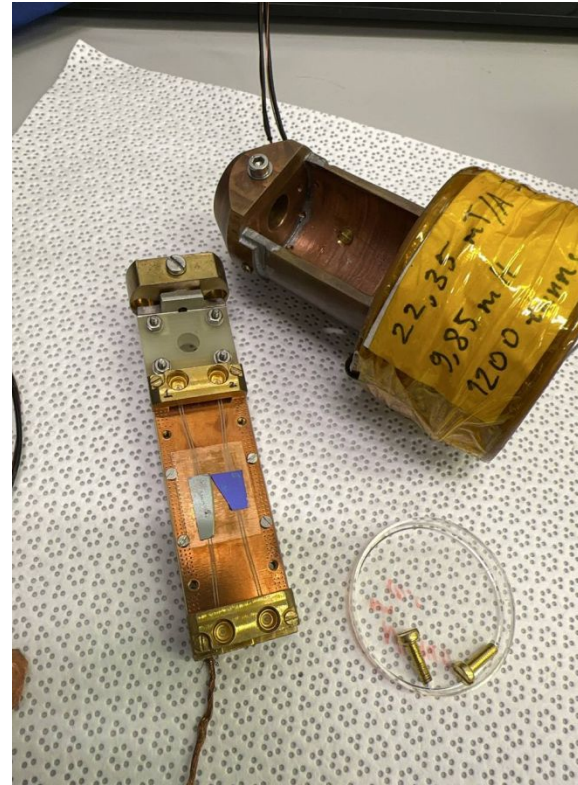
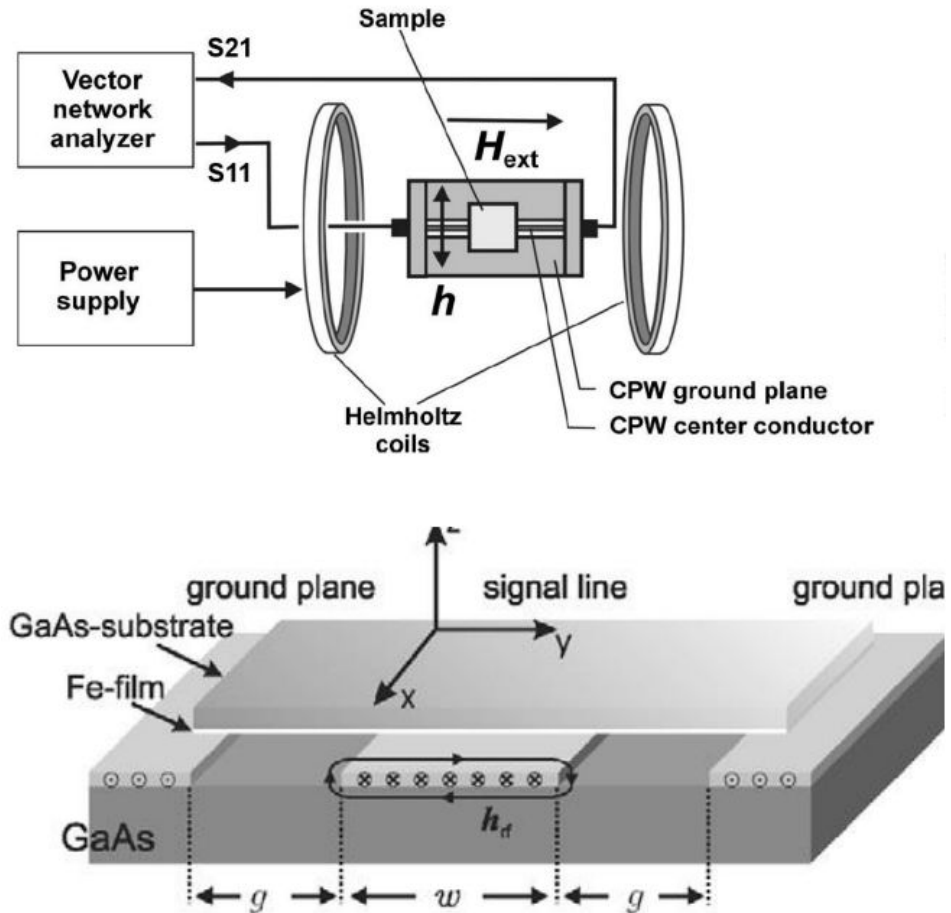
$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma\vec{M} \times \vec{H} + \frac{\alpha}{|\vec{M}|}\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt}$$

Формула Киттеля зависимости частоты ФМР от внешнего магнитного поля и характеристик образца в простейшем случае:

$$\left(\frac{2\pi f_r}{\gamma}\right)^2 = (H_0 + (N_x - N_z)M_s) \times (H_0 + (N_y - N_z)M_s)$$



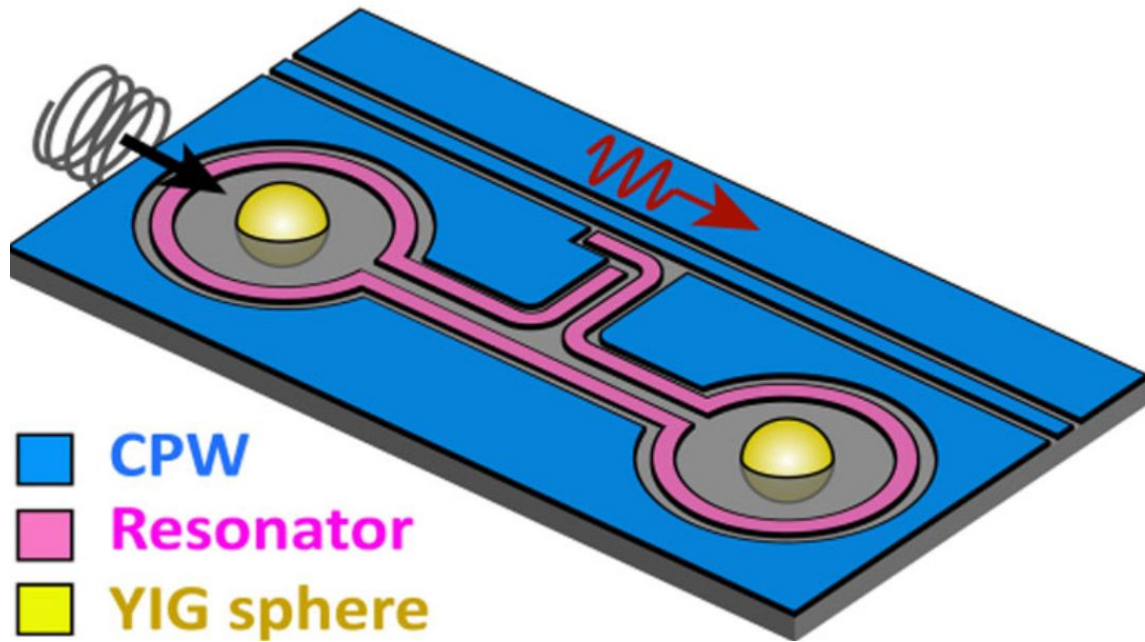
# Экспериментальная часть



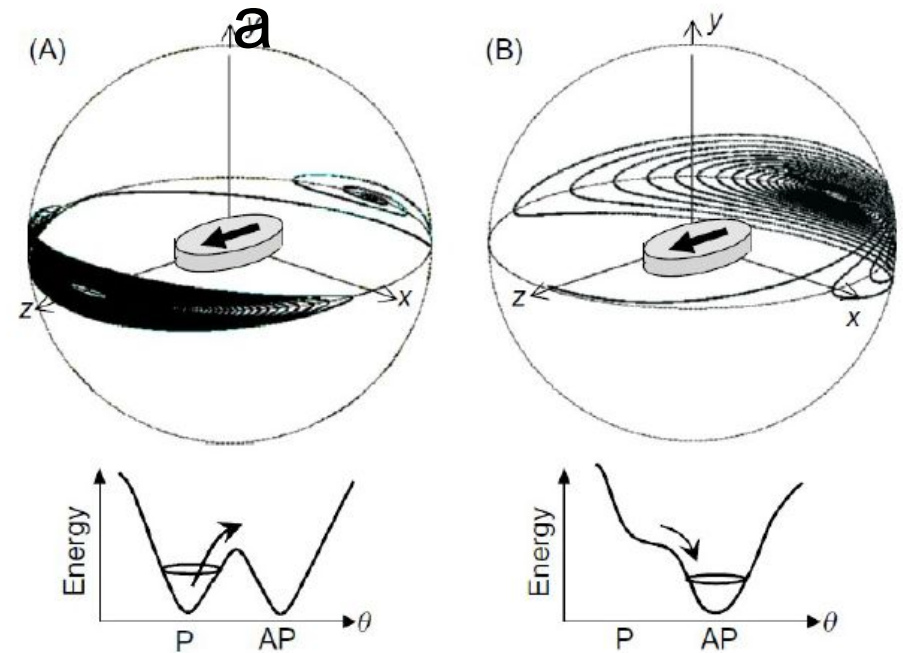
\*Neudecker et al., J. Magn. Magn. Mater. 307 (2006) 148–156

# Зачем это нужно?

## Новый тип кубитов



## Спинтроник

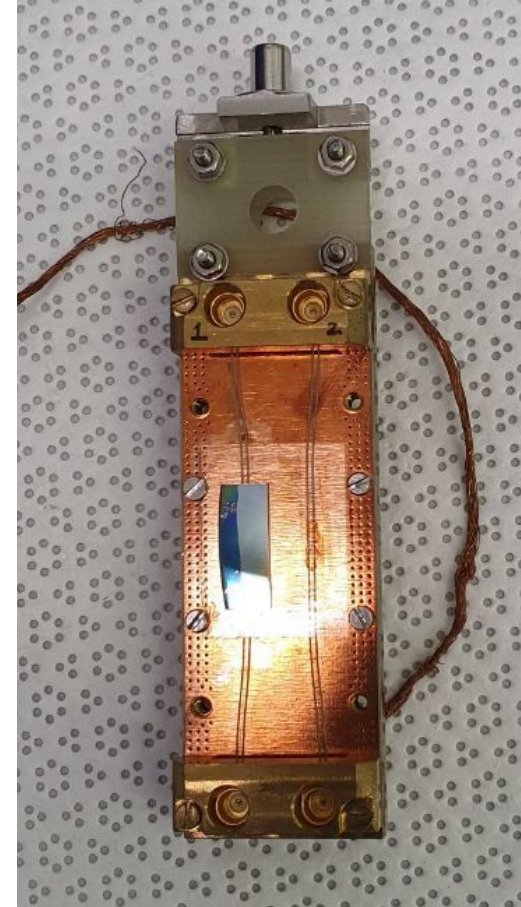


\*Yi Li/Argonne National Laboratory

\*Nanomagnetism and spintronics, edited by Teruya Shinjo, Second edition, 2014

# Исследуемая пленка пермаллоя

	YIG	Py	Unit
$\gamma$	$1.76 \times 10^{11}$	$1.76 \times 10^{11}$	1/T s
$4\pi M_s$	$1.4 \times 10^5$ a	$8.0 \times 10^5$ f	A/m
$D$	$5.0 \times 10^{-40}$ b	$5.5 \times 10^{-40}$ f	J m <sup>2</sup>
$\alpha$	$5 \times 10^{-5}$ a	0.01 <sup>g</sup>	
$\omega_0$	10 <sup>a</sup>	20 <sup>g</sup>	GHz
$\tau_{mp}$	10 <sup>-6</sup> c,d	10 <sup>-7</sup> (Ni) <sup>d</sup>	s
$\tau_m$	10 <sup>-9~7</sup> c,e	10 <sup>-9</sup> h	s
$g_r/A$	10 <sup>16</sup> a	10 <sup>18</sup> i	1/m <sup>2</sup>
$V_a^{1/3}$	14.1	11.7	nm
$\eta$	0.45	0.27	
$\lambda$ (th)	0.85–8.5	0.3	mm
$\lambda$ (expt.)		4.0 <sup>j</sup>	mm
$\xi$ (th)	0.25	4.4	$\mu$ V/K
$\xi$ (expt.)		0.25 <sup>j</sup>	$\mu$ V/K



# Чем мы будем заниматься

- Изучения теоретических основ динамики магнитного момента и способов решения уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта.
- Подготовка и проведение эксперимента ФМР спектроскопии для пленки пермаллоя
- Ознакомление с криостатом AttoCube
- Написание кода на Python для автоматизированного проведения эксперимента
- Обработка полученных данных для определения константы анизотропии и обменного взаимодействия образца пленки пермаллоя