

Спин и спинтроника. Сверхпроводниковая спинтроника.

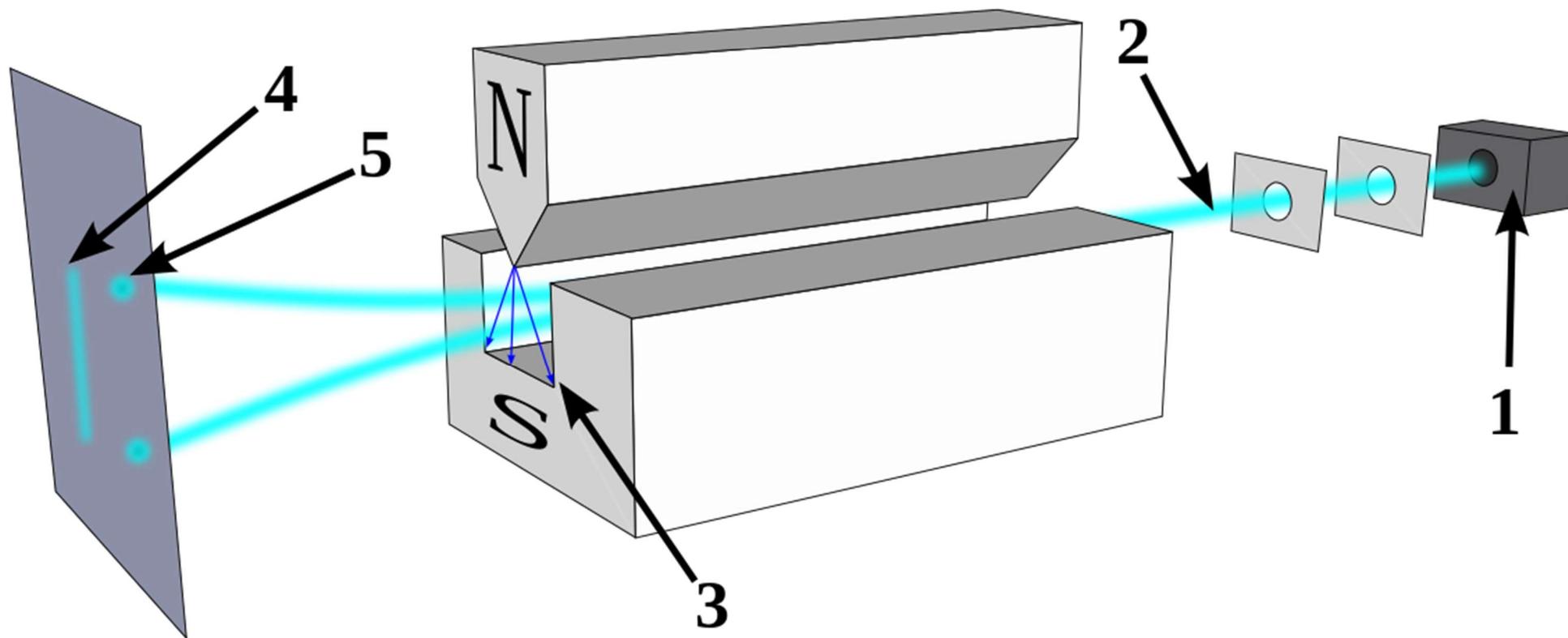
А.С.Мельников

Центр теоретической физики им. А.А.Абрикосова

План

- ◆ **Что такое спин?**
- ◆ **Каким образом можно воздействовать на спин?**
- ◆ **Можно ли путем воздействия на спин влиять на электронный транспорт?**
- ◆ **Взаимодействие магнетизма и сверхпроводимости.**
- ◆ **Как мы можем влиять на сверхток, управляя спинами электронов?**
- ◆ **перестройка типов куперовских пар через спин-зависящие взаимодействия.**

Спин как внутренний момент.



Взаимодействия, которые включают оператор спина электрона

Зеемановское или
обменное
взаимодействие

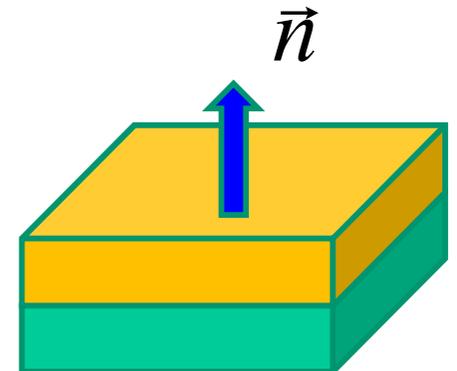
$$\delta\hat{H} = \vec{h} \hat{\vec{\sigma}}$$

Спин-орбитальное
взаимодействие

$$V_{so} = -\frac{e\hbar}{4m^2c^2} \vec{\sigma} [\vec{E}, \hat{\vec{p}}]$$

На интерфейсах:
взаимодействие
Рашба

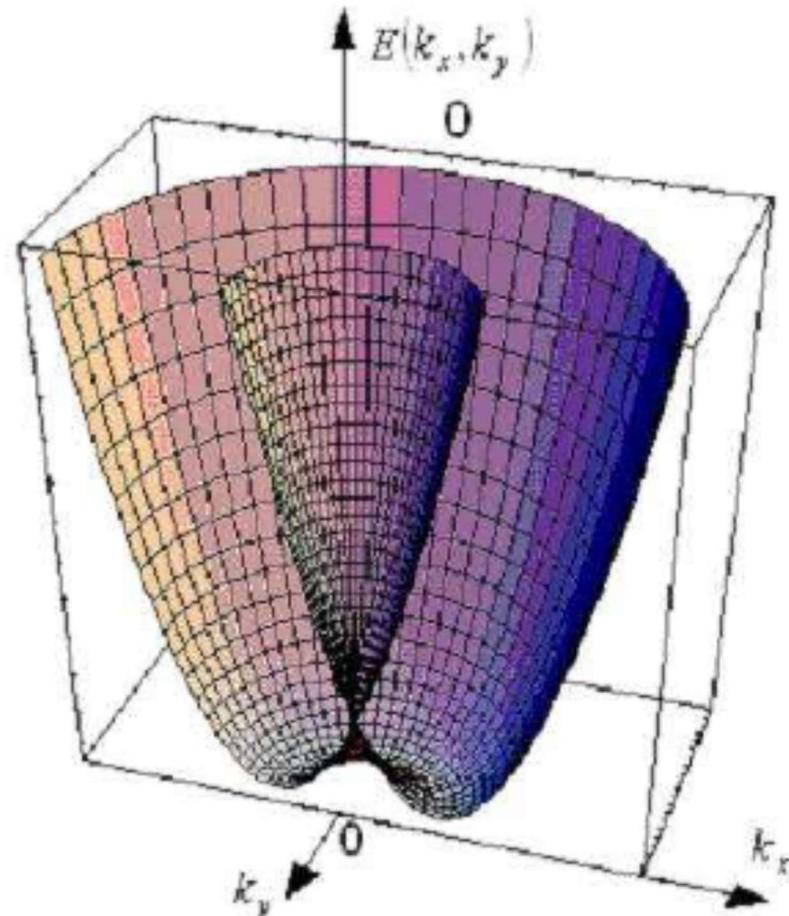
$$V_{rashba} = \alpha \vec{\sigma} [\vec{n}, \hat{\vec{p}}]$$



2D электроны в системе с взаимодействием Рашба.

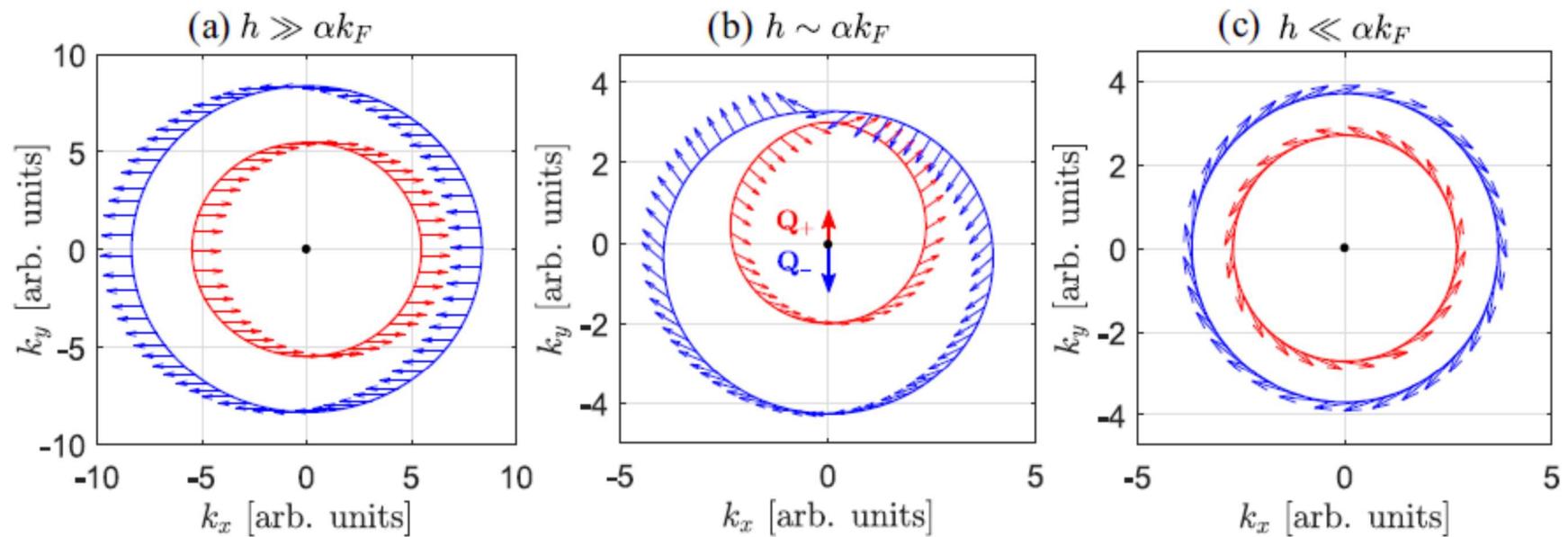
$$\mathbf{H} = \frac{\hbar^2 \mathbf{k}^2}{2m} + \alpha_s (\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{k}) \cdot \mathbf{z}$$

$$E(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \pm \alpha_s k$$



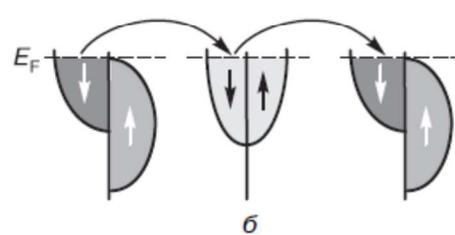
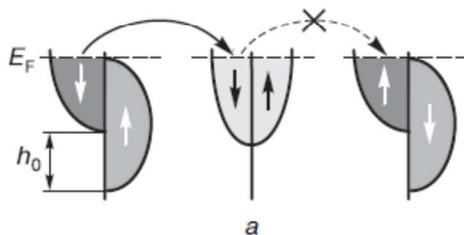
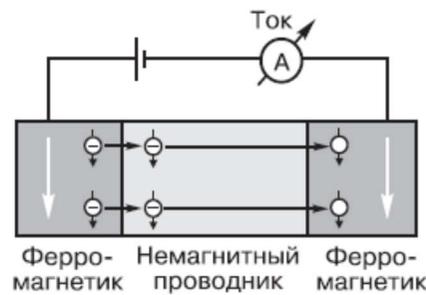
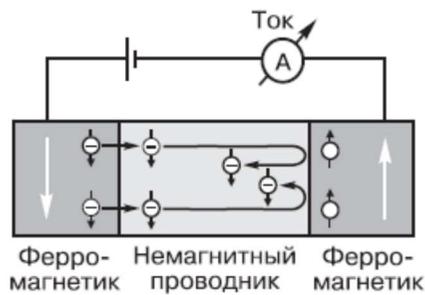
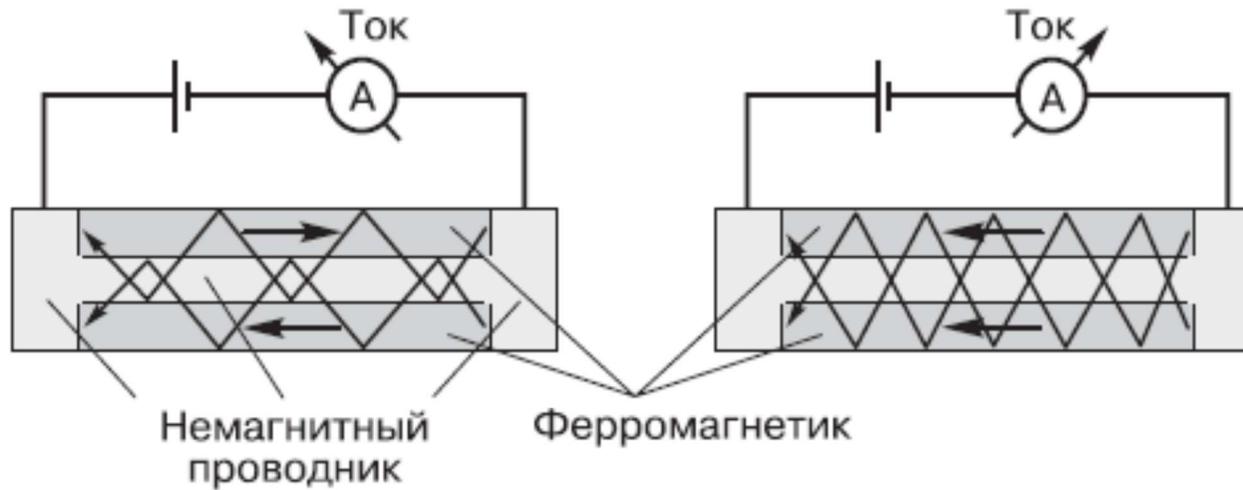
2D электроны в системе с взаимодействием Рашба + обменное взаимодействие.

$$\delta\hat{H} = \vec{h} \hat{\sigma}$$
$$V_{so} = \alpha \vec{\sigma} \left[\vec{n}, \hat{p} \right]$$



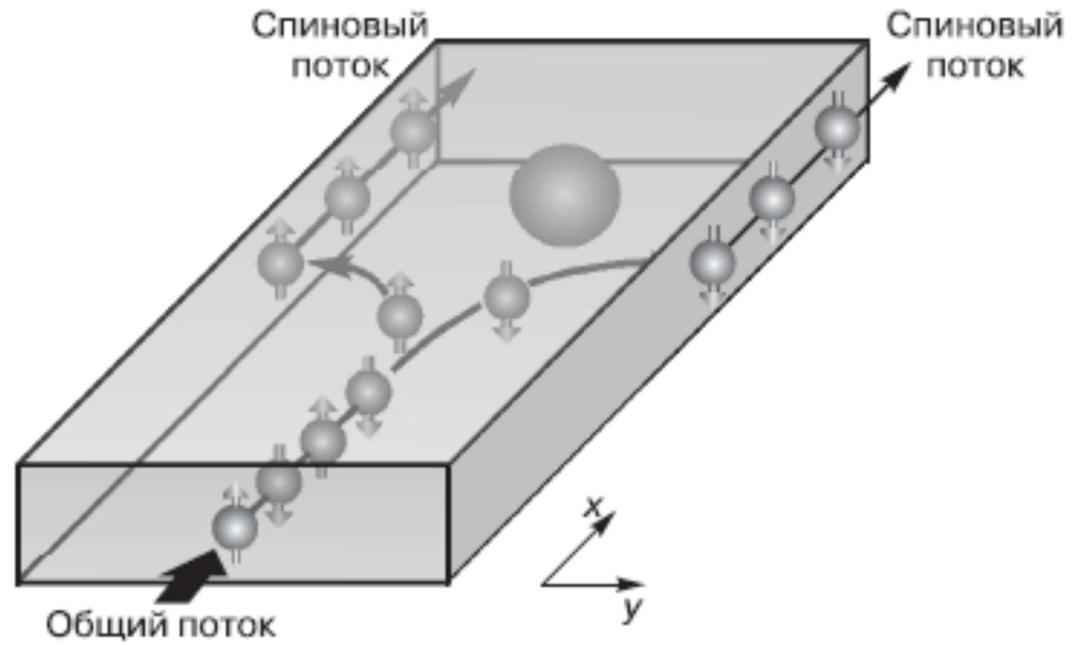
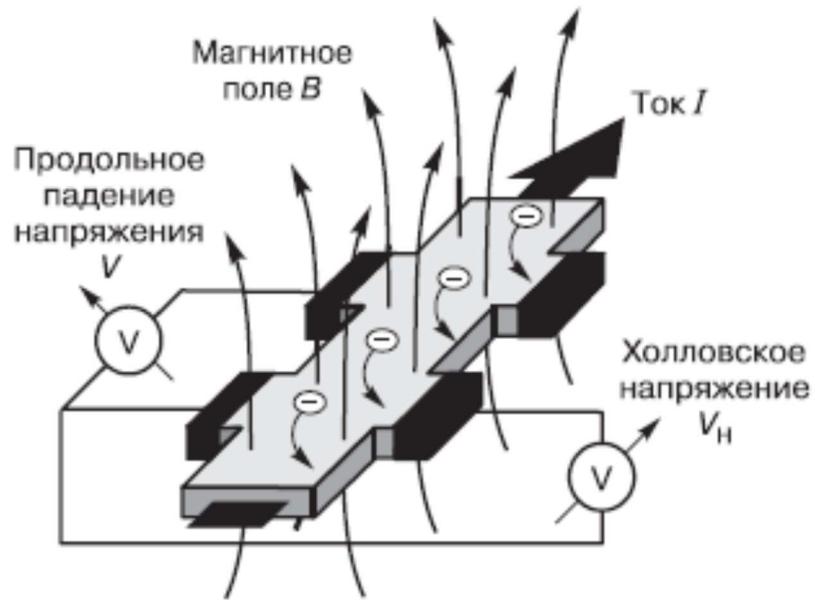
Как повлиять на ток электронов, воздействуя на их спин?

$$\delta\hat{H} = \vec{h}(\vec{r})\hat{\sigma}$$

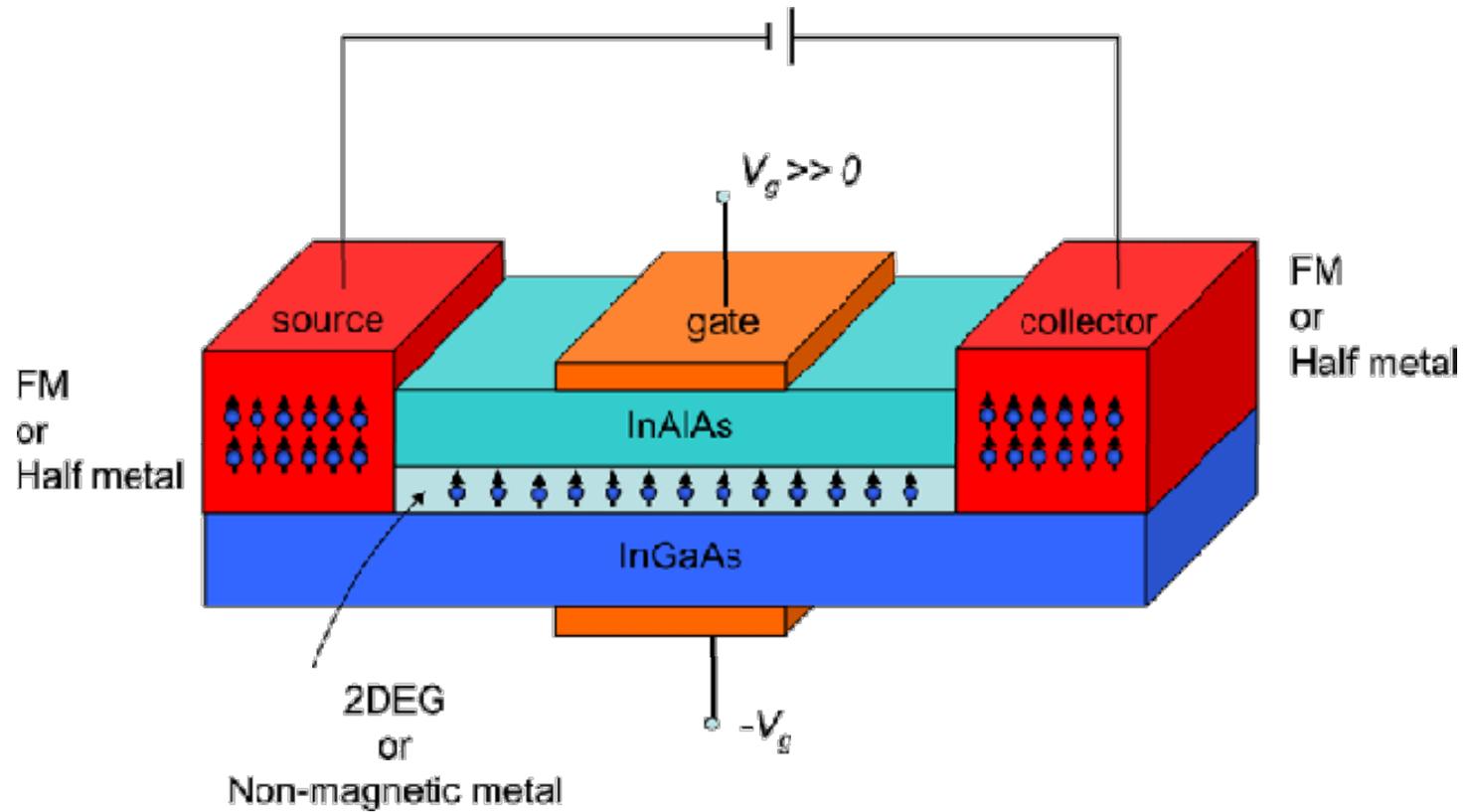


Нобелевская премия 2007 года -
Альберт Ферт и Петер Грюнберг

Спиновый эффект Холла



Спиновый полевой транзистор



Спин-орбитальное взаимодействие и невзаимный транспорт

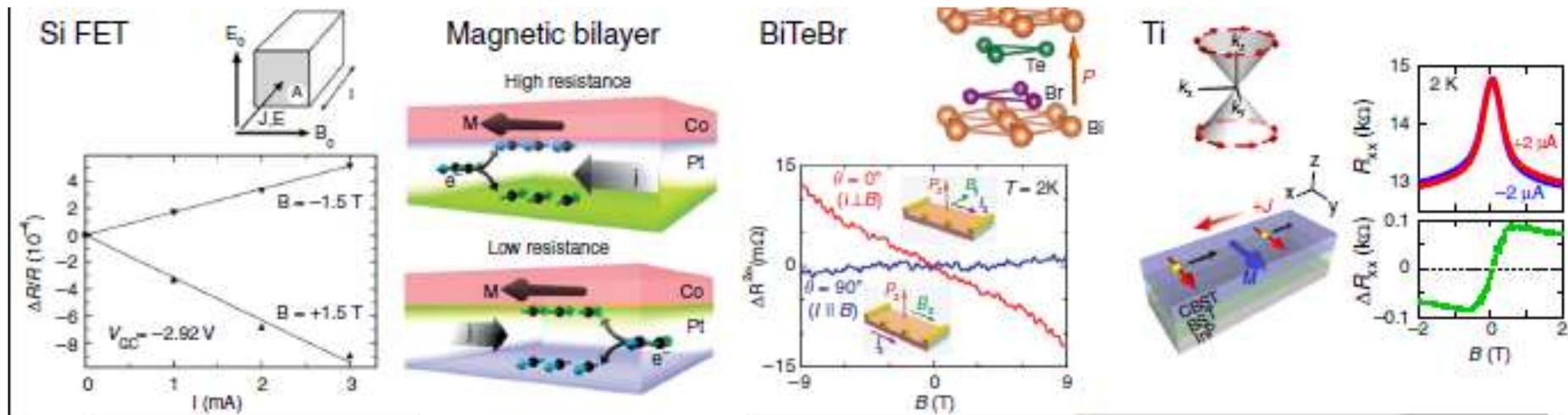
Magneto-chiral anisotropy: breaking of time reversal symmetry and inversion symmetry

Electrical Magneto-chiral Anisotropy

G. L. J. A. Rikken,¹ J. Fölling,² and P. Wyder¹

¹Grenoble High Magnetic Field Laboratory, Max Planck Institut für Festkörperforschung/Centre National de la Recherche Scientifique, BP 166, F-38042 Grenoble, France

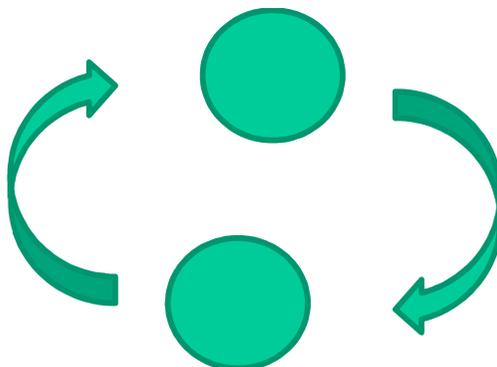
²Fakultät für Physik, Universität Konstanz, Universitätsstrasse 10, 78457 Konstanz, Germany
(Received 29 March 2001; published 14 November 2001)



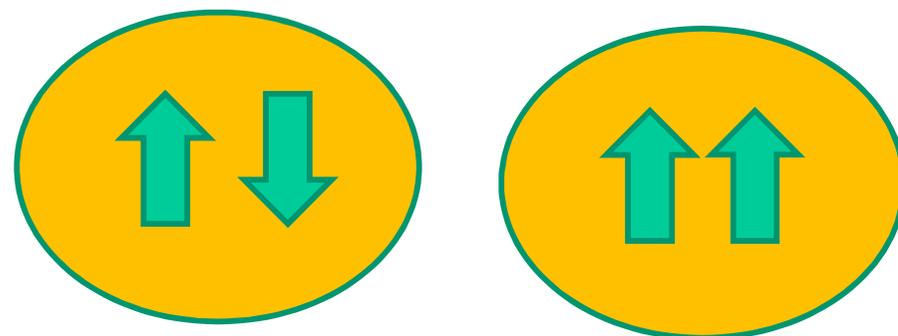
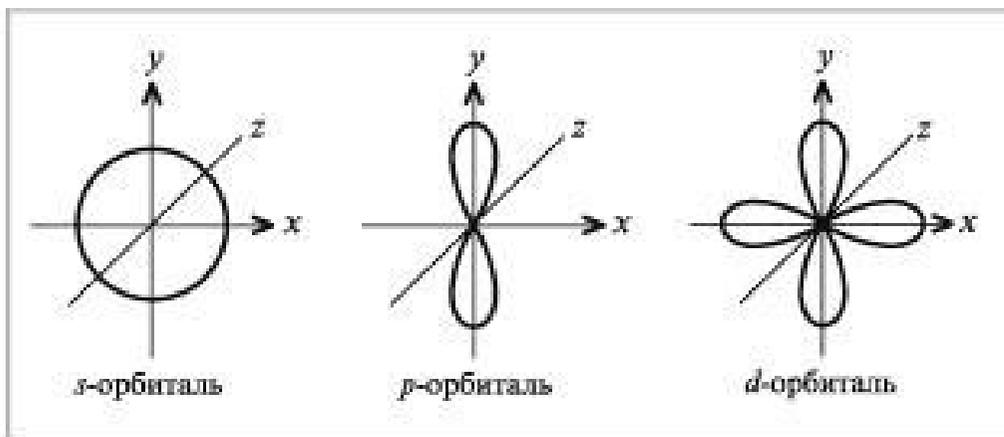
$$R = R_0(1 + \gamma(\mathbf{B} \times \mathbf{z}) \cdot \mathbf{I})$$

Электроны в сверхпроводнике. Структура куперовских пар

Орбитальная структура.
Момент импульса взаимного движения.
Как в атоме!
s, p, d – орбитали



Спиновая структура.
Собственный момент электронов = спин.
Для 2х частиц: синглетные и триплетные состояния



$$\Delta_{\alpha\beta}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \Delta_{\alpha\beta}(\vec{r}, \vec{R})$$

$$\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$$

$$\vec{R} = \frac{\vec{r}_1 + \vec{r}_2}{2}$$

Что такое сверхпроводящая спинтроника?

= управление сверхпроводящим транспортом через воздействие на спины электронов

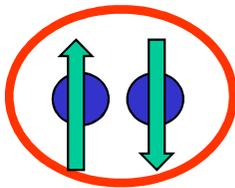
$$R = 0$$



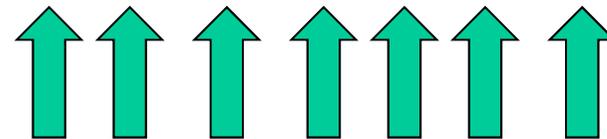
$$R \neq 0$$

Если спины электронов в паре
противоположны=синглетное состояние

2e



Обменное взаимодействие приводит к
появлению ферромагнетизма (спины
электронов сонаправлены)

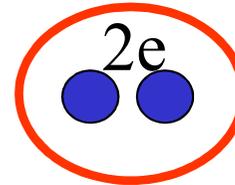


Очевиден конфликт! И магнетизм должен
побеждать:

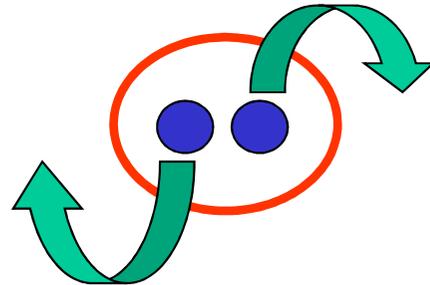
$$T_k \gg T_c$$

**- Как воздействует магнитное поле на сверхпроводимость?
- Разрушает пары.**

Механизмы взаимодействия магнитного поля с куперовской парой

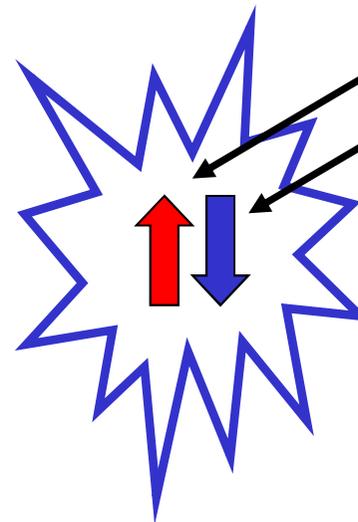


✿ орбитальный (электромагнитный) механизм



Спины
электронов в паре

✿ взаимодействие с электронными спинами



Но лучше управлять сверхпроводимостью через посредника – ферромагнетик.

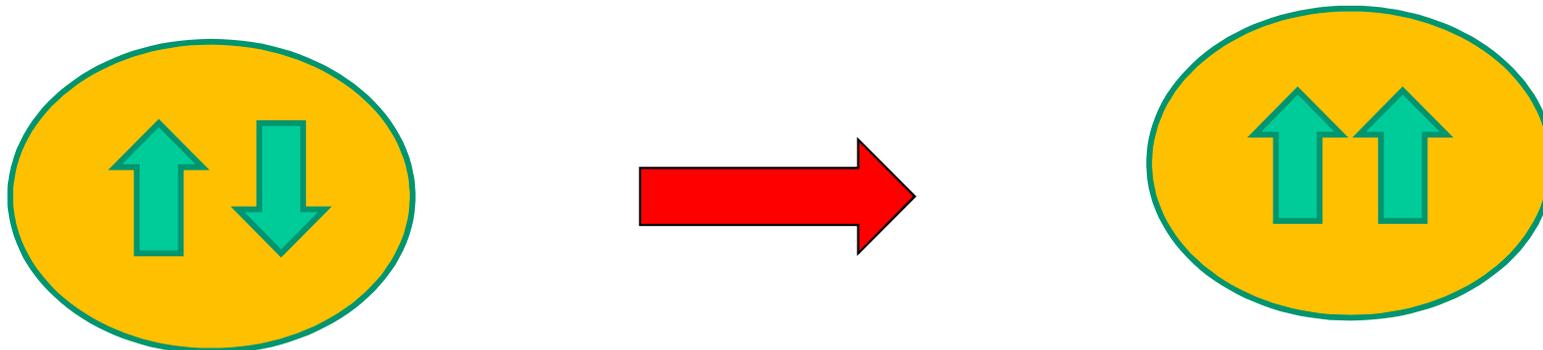
Механизмы воздействия ферромагнетика на сверхпроводник.

*Магнитное поле магнетика
меняет траектории электронов
и разрушает пары*

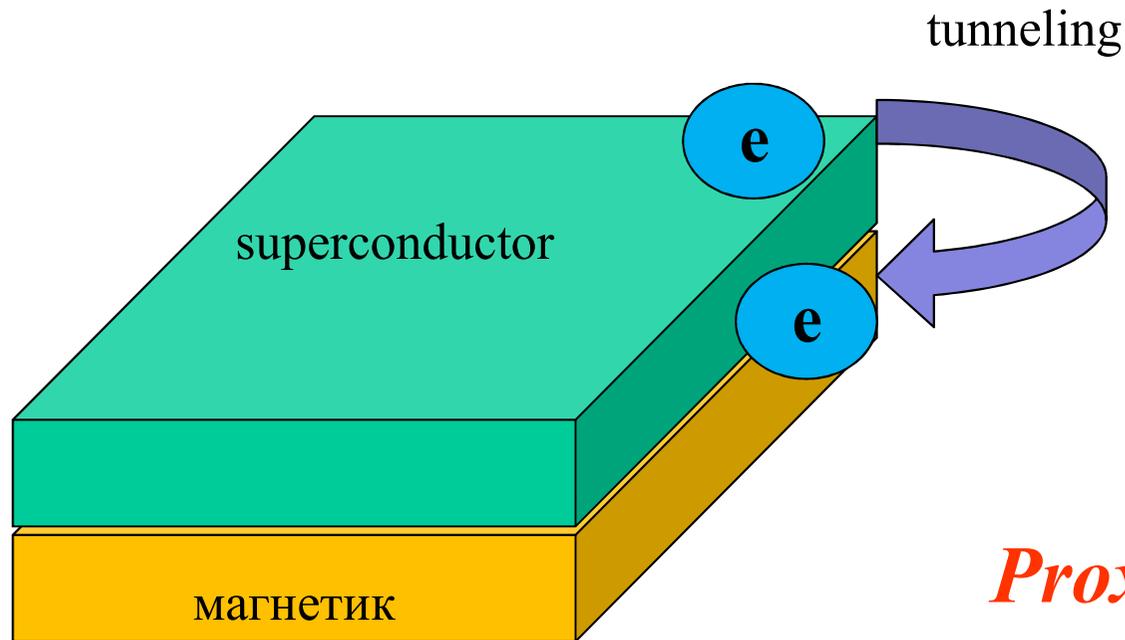
*Обменное поле магнетика
выстраивает спины
и разрушает пары*

Что забыто?

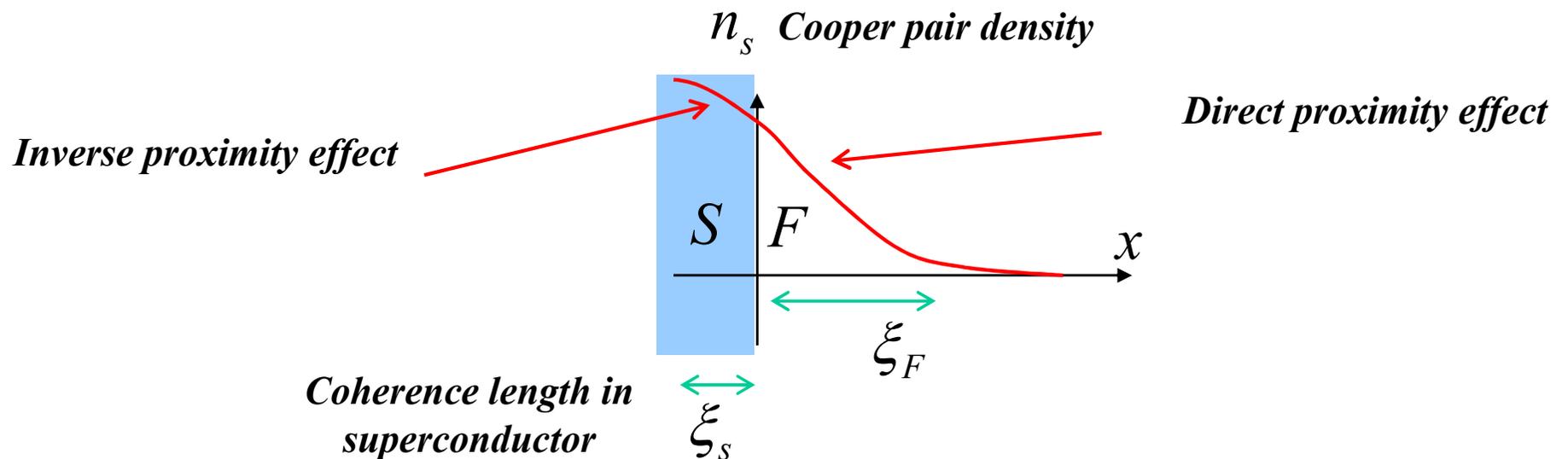
Превращение синглетных пар в триплетные



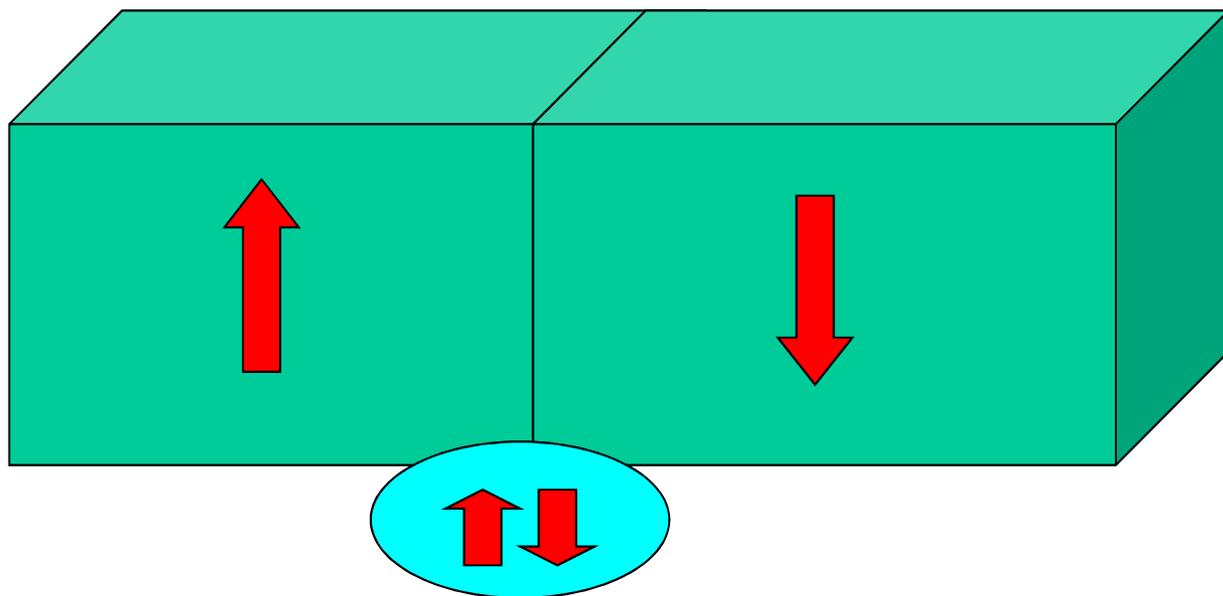
**Ферромагнитные сверхпроводники очень трудно найти.
Как в одном образце иметь и магнетизм и сверхпроводимость?
Ответ: гетероструктура с эффектом близости**



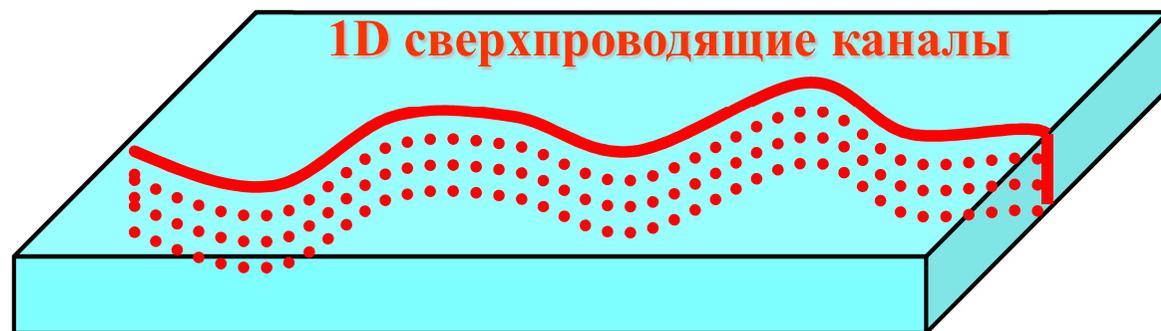
Proximity effect.



*Пример управления сверхпроводимостью:
Доменная сверхпроводимость*



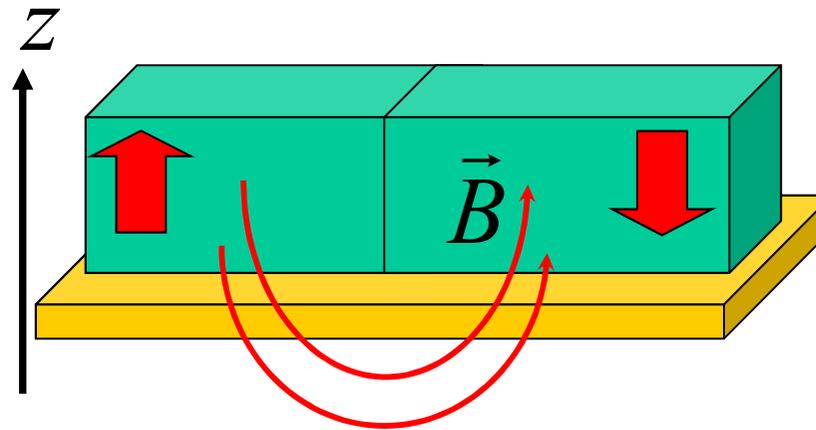
Cooper pair



Electromagnetic (orbital) mechanism. Phenomenological Ginzburg-Landau theory

External field H + Inhomogeneous magnetic field induced by magnetic moments

$$-\left(\nabla + \frac{2\pi i}{\Phi_0} \vec{A}(\vec{r})\right)^2 \Psi = \frac{1}{\xi^2(T)} \Psi$$



$$H_{c2}^{\perp} \ll H_{c2}^{\parallel}$$

Thin superconducting films: Only B_z field component is important

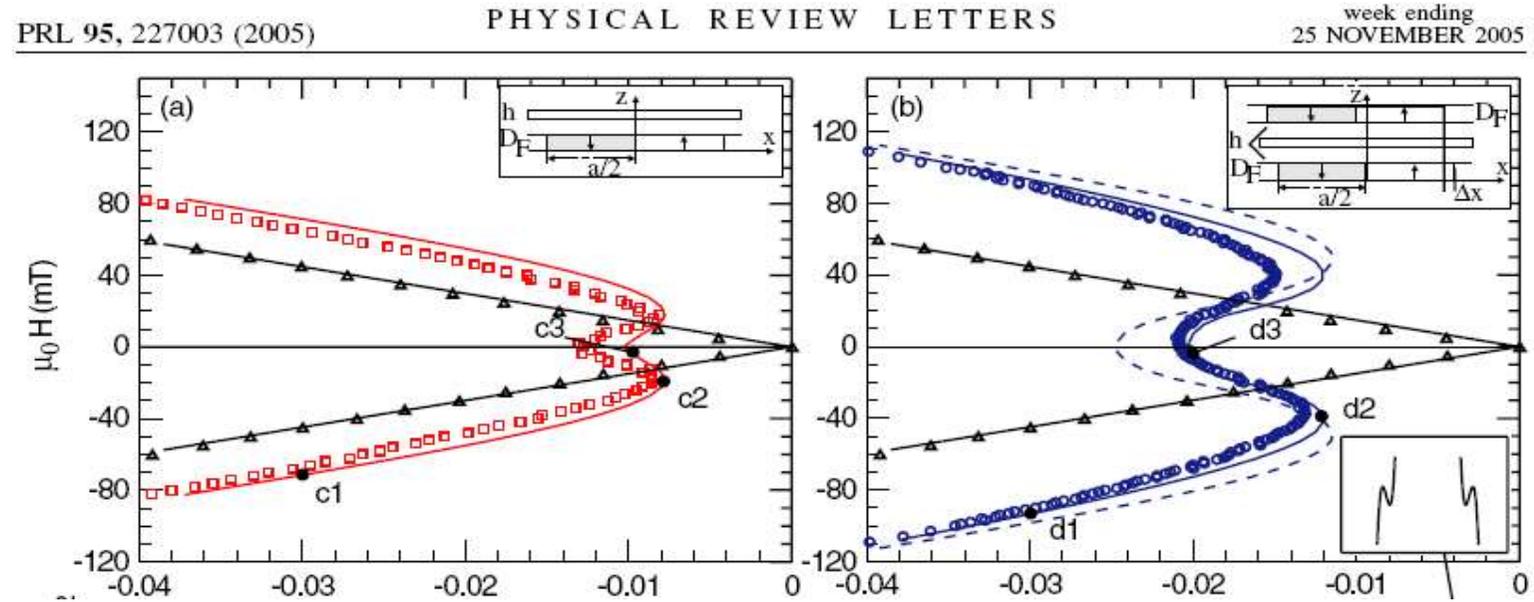
Assumption: Domain walls are pinned

Зарождение сверхпроводимости в неоднородном магнитном поле: эксперимент

*Phys.Rev.Lett (2005),
Phys.Rev.B (2007-2008)*

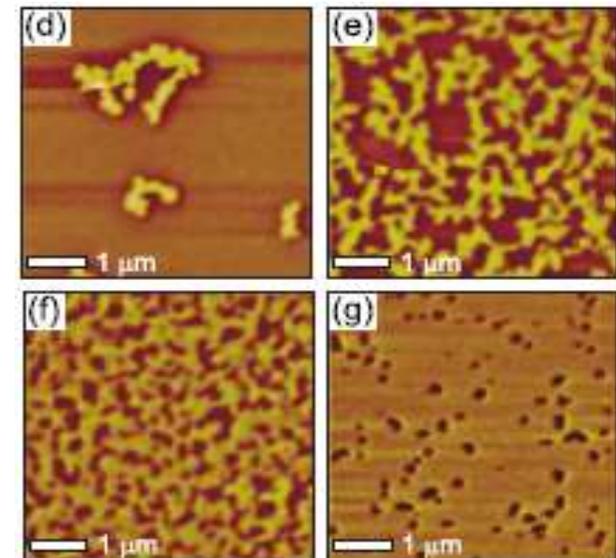
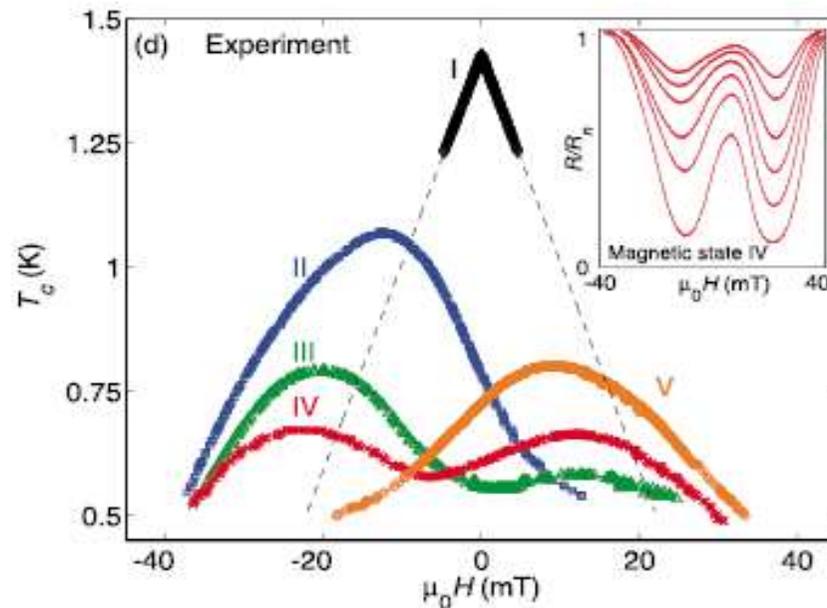
CoPt / Nb / CoPt:

Влияние **амплитуды**
неоднородного
магнитного поля

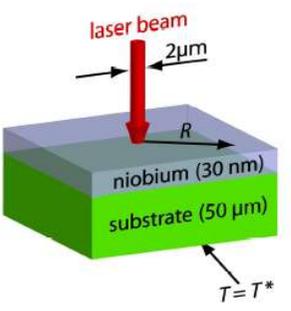
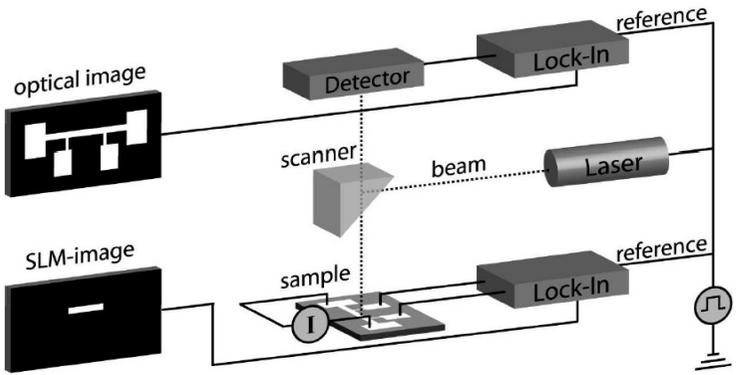


CoPt / Al:

Влияние **пространственной**
структуры
неоднородного
магнитного поля
(ширины доменов)

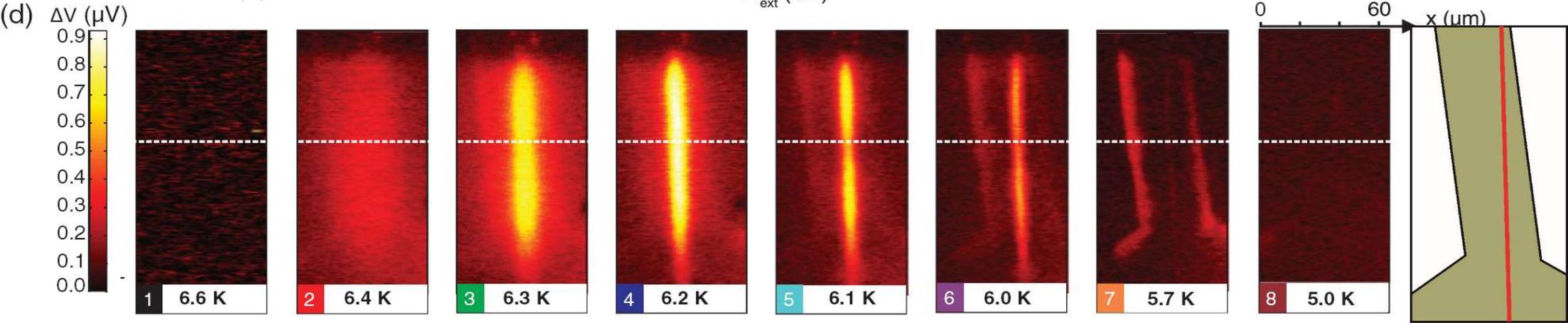
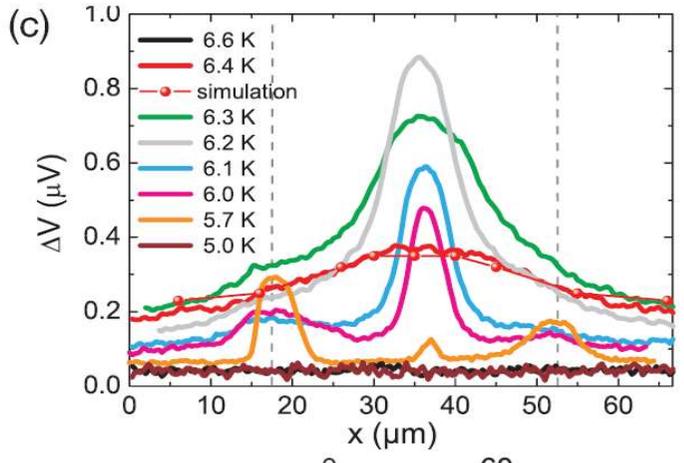
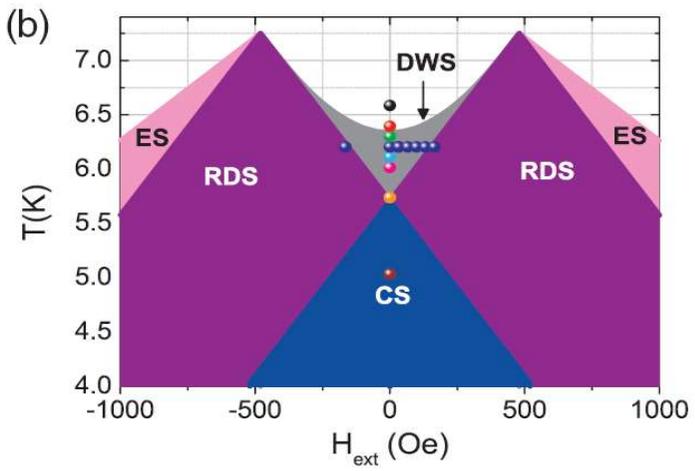
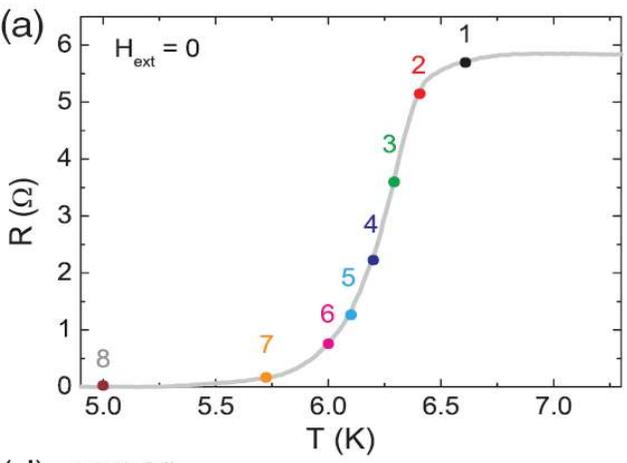


Визуализация доменной сверхпроводимости посредством низкотемпературной сканирующей лазерной микроскопии

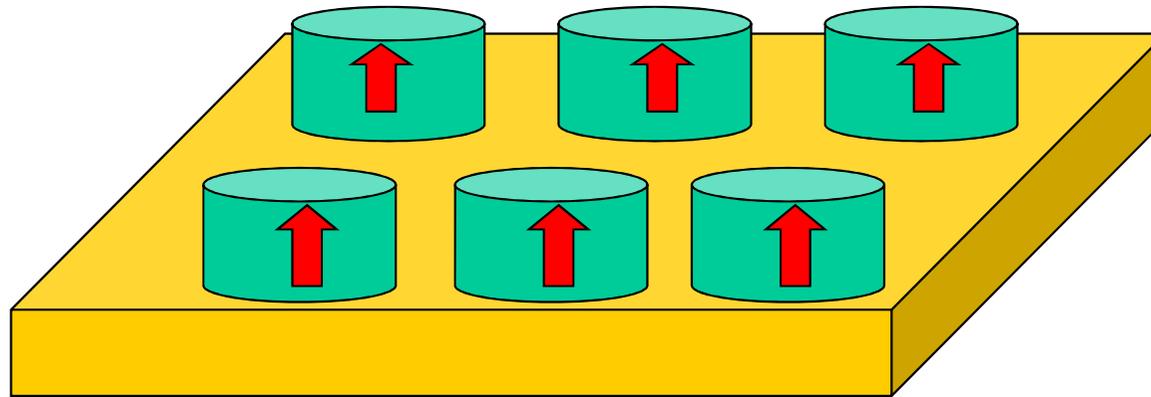


Сверхпроводник: Pb
 Ферромагнетик: BaFe₁₂O₁₉

R. Werner, A. Yu. Aladyshkin *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 020505(R) (2011).



Superconducting films with arrays of ferromagnetic dots



Unusual behavior of $T_c(H)$:

Y.Otani, B.Pannetier, J.P.Noziers,
D.Givord (1993)

W.Gillijns, A. Silhanek,
V.Moshchalkov (2006)

$T_c(H)$ oscillations

Nb-Gd/Co

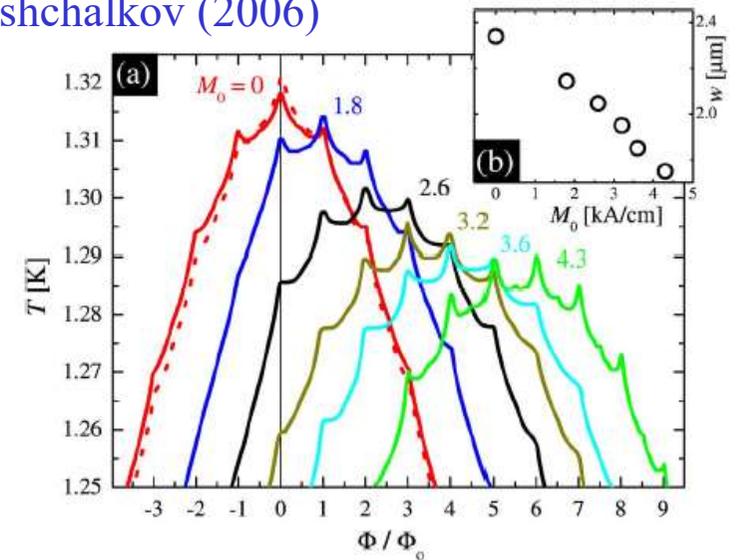
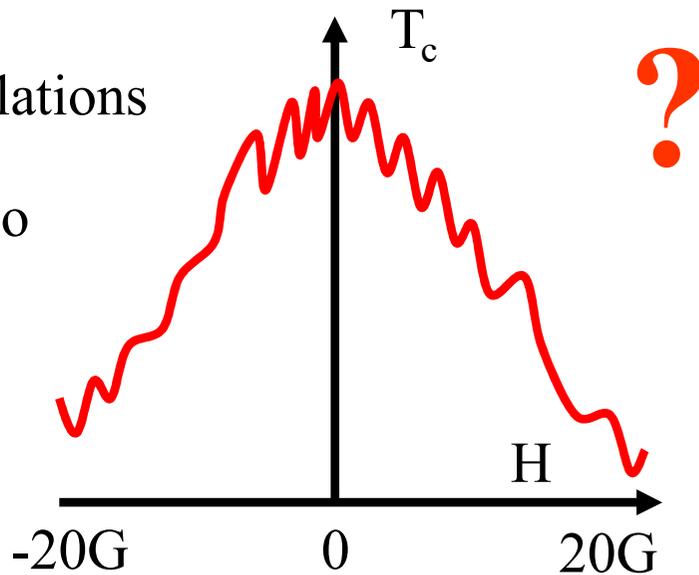
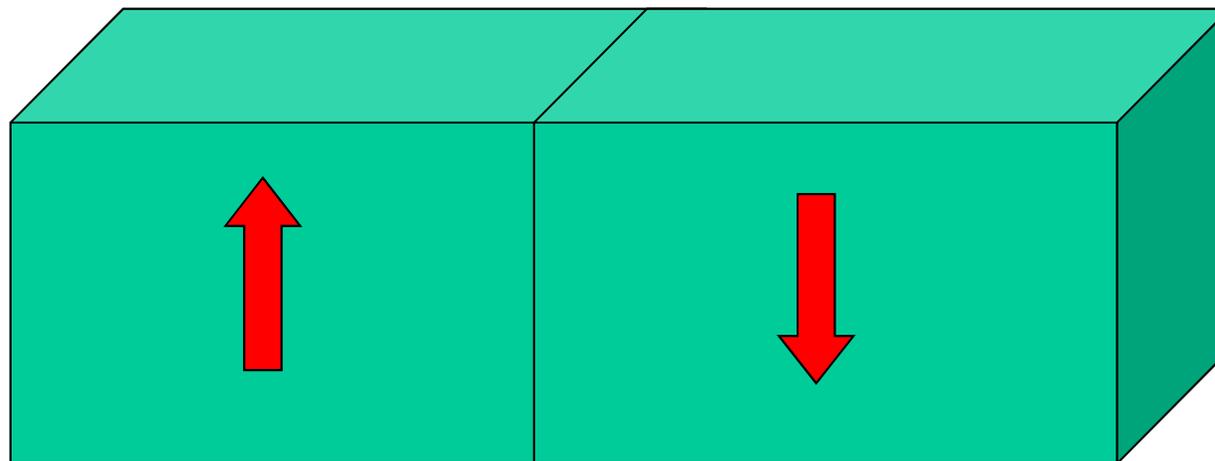


FIG. 2. (Color online) (a) Superconducting transition $T_c(H)$ of the Al film for different magnetic states of the dots. By increasing the magnetization a clear shift of $T_c(H)$ and a decrease of T_c^{max} is observed. (b) Lateral dimension w of the nucleation of superconductivity as a function of the magnetization of the dots.

Управление сверхпроводимостью через управление магнитным моментом.

Способ: изменение распределения намагниченности



Создание спонтанных неоднородных, токовых, вихревых состояний: ЛОФФ, пи-контакты в джозефсоновских сетях, и т.д.

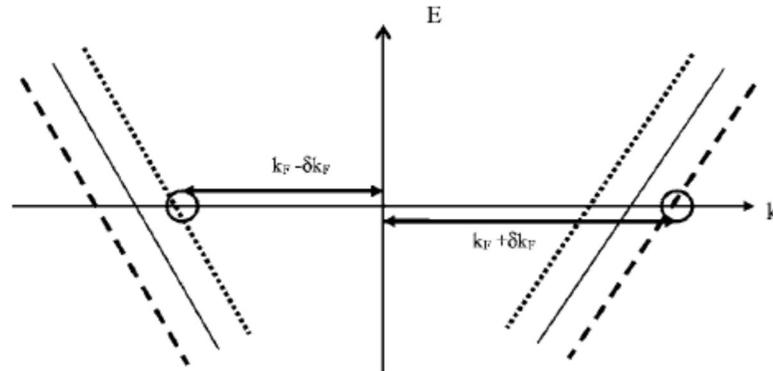
Управление критической температурой сверхпроводящего перехода: сверхпроводящие каналы на доменных границах, спиновые вентили

Exchange mechanism. Proximity effect in FS structures.

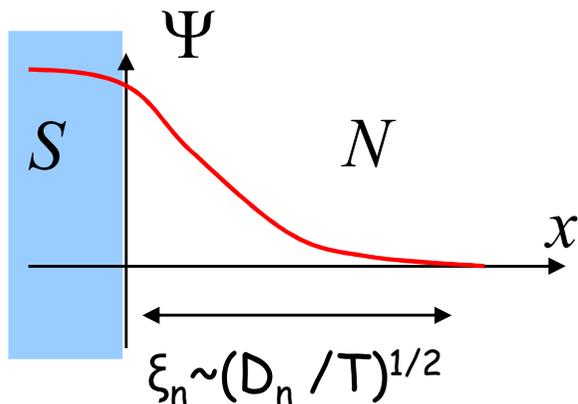
$$\delta\hat{H} = \vec{h} \hat{\sigma}$$

Inhomogeneous superconductivity induced by the exchange field:

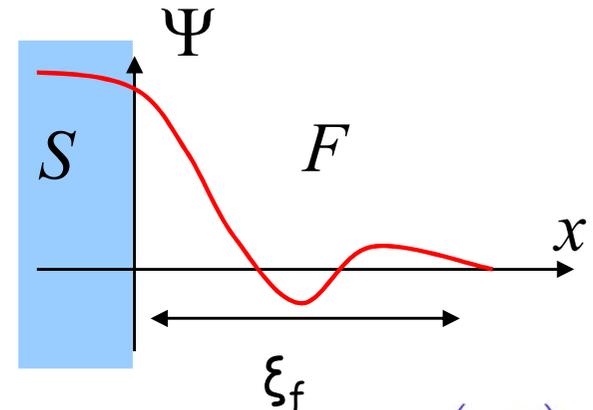
1. FFLO state



2. Interference effects for Cooper pairs in FS layered structures



Damped oscillatory dependence of pair wave function in ferromagnets



$h = \text{exchange energy}$

$$\Psi \sim \Delta \exp\left(-\frac{x}{\xi_f}\right) \cos\left(\frac{x}{\xi_f}\right)$$

in dirty limit:

$$\xi_f = \sqrt{\frac{D_f}{h}}$$

Сверхпроводящая спинтроника: примеры устройств

Письма в ЖЭТФ, том 25, вып. 7, стр. 314 – 318

5 апреля 1977 г.

СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ СИСТЕМА СО СЛАБОЙ СВЯЗЬЮ С ТОКОМ В ОСНОВНОМ СОСТОЯНИИ

Л.Н.Булаевский, В.В.Кузий, А.А.Собянин

Рассмотрено сверхпроводящее кольцо с джозефсоновским контактом, содержащим магнитные примеси. Показано, что если туннелирование через магнитные примеси достаточно велико, то для такой системы основным состоянием является состояние с током и магнитным потоком.

Письма в ЖЭТФ, том 53, вып. 6, стр. 308 - 312

25 марта 1991 г.

ДЖОЗЕФСОНОВСКИЙ КОНТАКТ С ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПРОСЛОЙКОЙ

А.И.Буздин, М.Ю.Куприянов

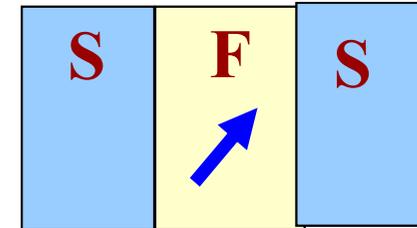
Critical-current oscillations as a function of the exchange field and thickness of the ferromagnetic metal (*F*) in an *S-F-S* Josephson junction

A. I. Buzdin, L. N. Bulaevskii, and S. V. Panyukov
P. N. Lebedev Physics Institute, Academy of Sciences of the USSR

(Submitted 19 December 1981)

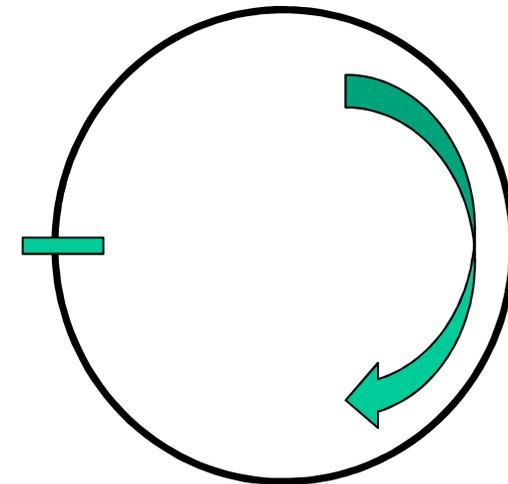
Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **35**, No. 4, 147–148 (20 February 1982)

Пи-контакты



$$I = \pm I_c \sin \varphi_{12}$$

$$\Delta E = \mp E_J \cos \varphi_{12}$$



Сверхпроводящая спинтроника: примеры устройств

VOLUME 86, NUMBER 11

PHYSICAL REVIEW LETTERS

12 MARCH 2001

Coupling of Two Superconductors through a Ferromagnet: Evidence for a π Junction

V. V. Ryazanov,¹ V. A. Oboznov,¹ A. Yu. Rusanov,¹ A. V. Veretennikov,¹ A. A. Golubov,² and J. Aarts³

PRL 96, 197003 (2006)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
19 MAY 2006

Thickness Dependence of the Josephson Ground States of Superconductor-Ferromagnet-Superconductor Junctions

V. A. Oboznov,¹ V. V. Bol'ginov,¹ A. K. Feofanov,¹ V. V. Ryazanov,^{1,*} and A. I. Buzdin²

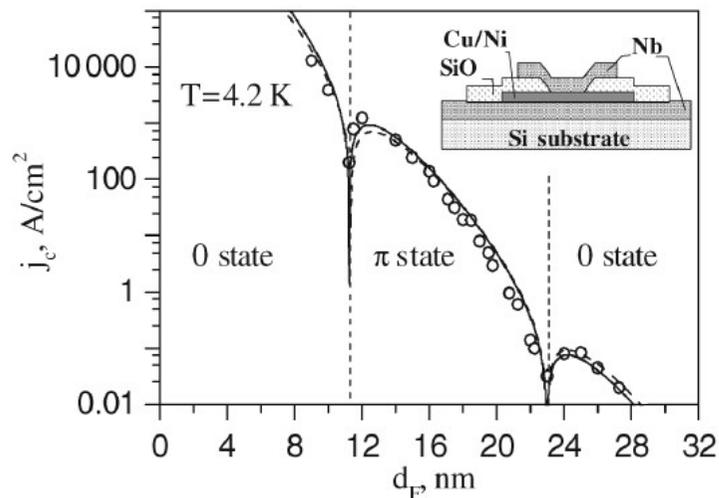
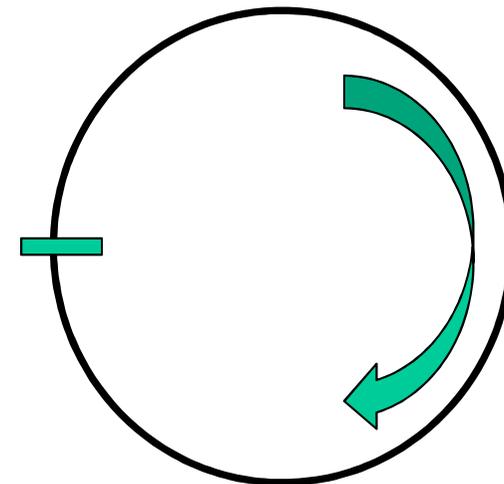


FIG. 1. The F -layer thickness dependence of the critical current density for Nb-Cu_{0.47}Ni_{0.53}-Nb junctions at temperature 4.2 K. Open circles represent experimental results; solid and dashed lines show model calculations discussed in the second part of the Letter. The inset shows a schematic cross section of our SFS junctions.

Пи-контакты



Сверхпроводящая спинтроника: примеры устройств

Спиновые вентили

VOLUME 83, NUMBER 10

PHYSICAL REVIEW LETTERS

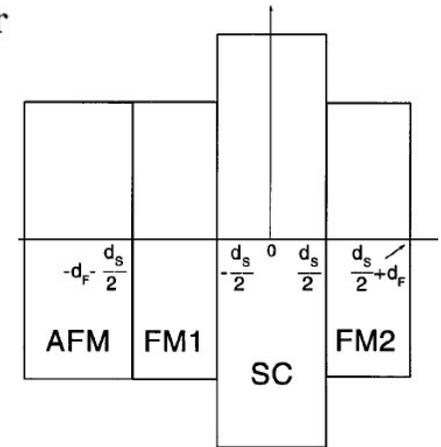
6 SEPTEMBER 1999

Low-Field Superconducting Spin Switch Based on a Superconductor/Ferromagnet Multilayer

L. R. Tagirov

Spin-orientation-dependent superconductivity in F/S/F structures

A. I. BUZDIN, A. V. VEDYAYEV(*) and N. V. RYZHANOVA(*)



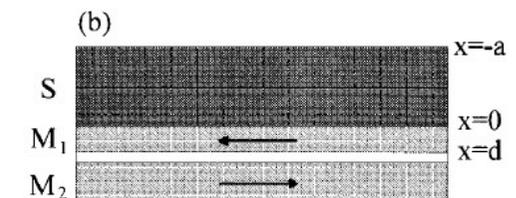
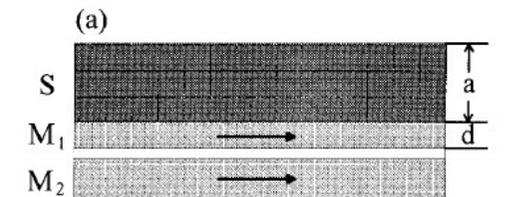
A superconductive magnetoresistive memory element using controlled exchange interaction

Sangjun Oh and D. Youm

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Kusung-Dong, Yuseong-Gu, Taejon 305-701, Korea

M. R. Beasley^{a)}

Department of Applied Physics, Stanford University, Via Palou, Stanford, California 94305-4085



Сверхпроводящая спинтроника: примеры устройств

PRL 109, 057005 (2012)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
3 AUGUST 2012

Evidence for Triplet Superconductivity in a Superconductor-Ferromagnet Spin Valve

P. V. Leksin,¹ N. N. Garif'yanov,¹ I. A. Garifullin,^{1,*} Ya. V. Fominov,^{2,3} J. Schumann,⁴ Y. Krupskaya,⁴ V. Kataev,⁴
O. G. Schmidt,⁴ and B. Büchner^{4,5}

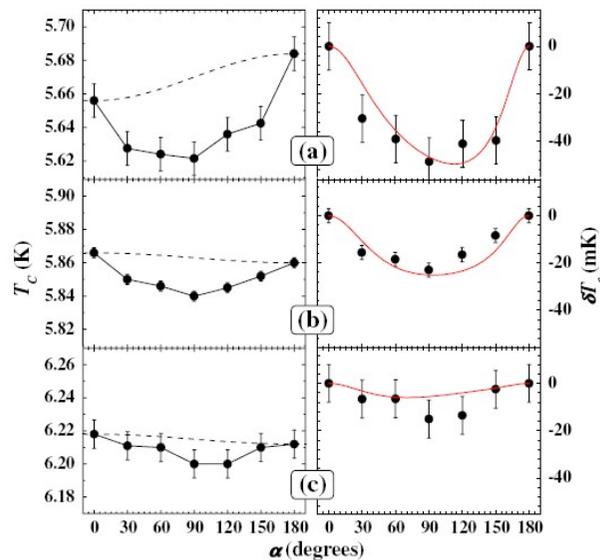


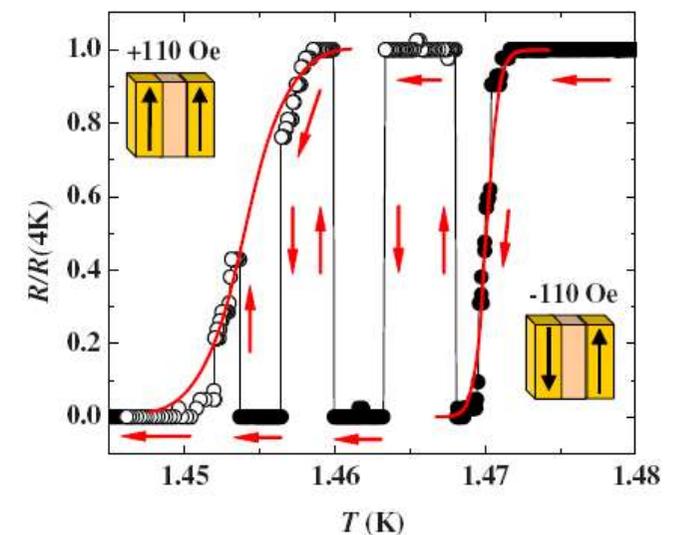
FIG. 3 (color online). Left: Dependence of T_c on the angle between magnetizations of the Fe1 and Fe2 layers measured in a field $H = 1$ kOe for the samples with $d_{Fe2} = 0.6$ (a), 1.0 (b), and 1.5 nm (c). Dashed lines are the reference curves calculated according to Eq. (2). Right: Deviations δT_c of the actual T_c values from the respective reference curves. Solid lines are theoretical results for δW (see the text).

Спиновые вентили

APPLIED PHYSICS LETTERS 97, 102505 (2010)

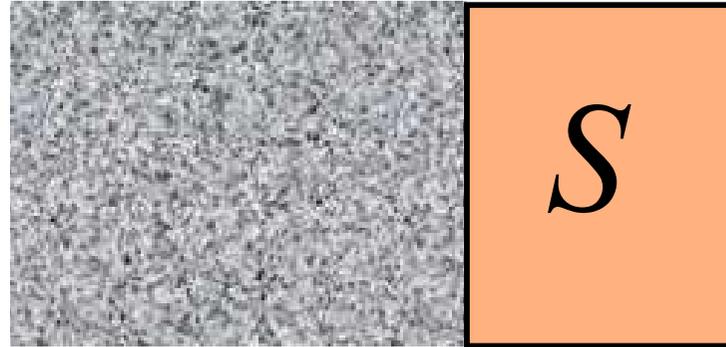
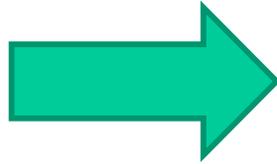
Full spin switch effect for the superconducting current in a superconductor/ferromagnet thin film heterostructure

P. V. Leksin,¹ N. N. Garif'yanov,¹ I. A. Garifullin,^{1,a)} J. Schumann,² H. Vinzelberg,²
V. Kataev,² R. Klingeler,^{2,3} O. G. Schmidt,² and B. Büchner²



Q. Нельзя ли эффект близости использовать еще как-нибудь?
С целью управления структурой куперовских пар.

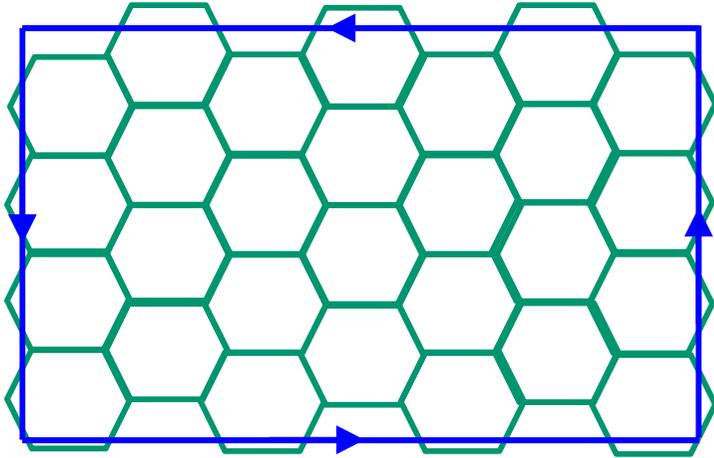
Apply, e.g., magnetic field



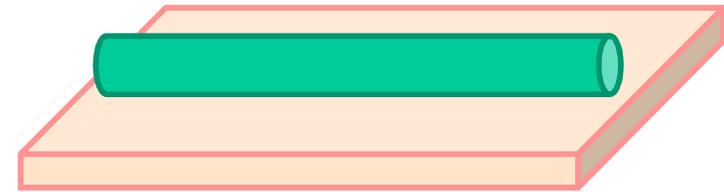
Металл, ферромагнетик, или полупроводник с
экзотическими свойствами электронов

Examples

Graphene nanoribbons



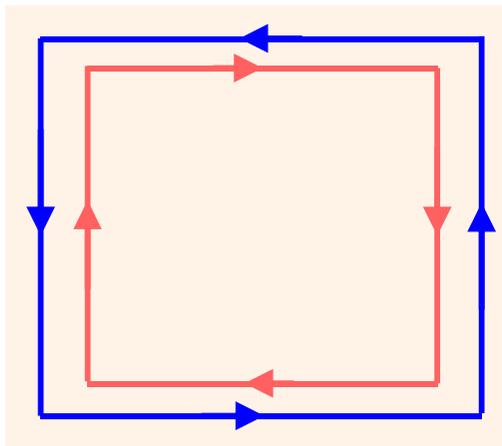
nanowires



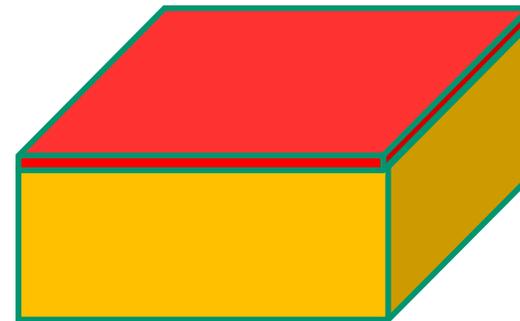
superconductor

Topological insulators

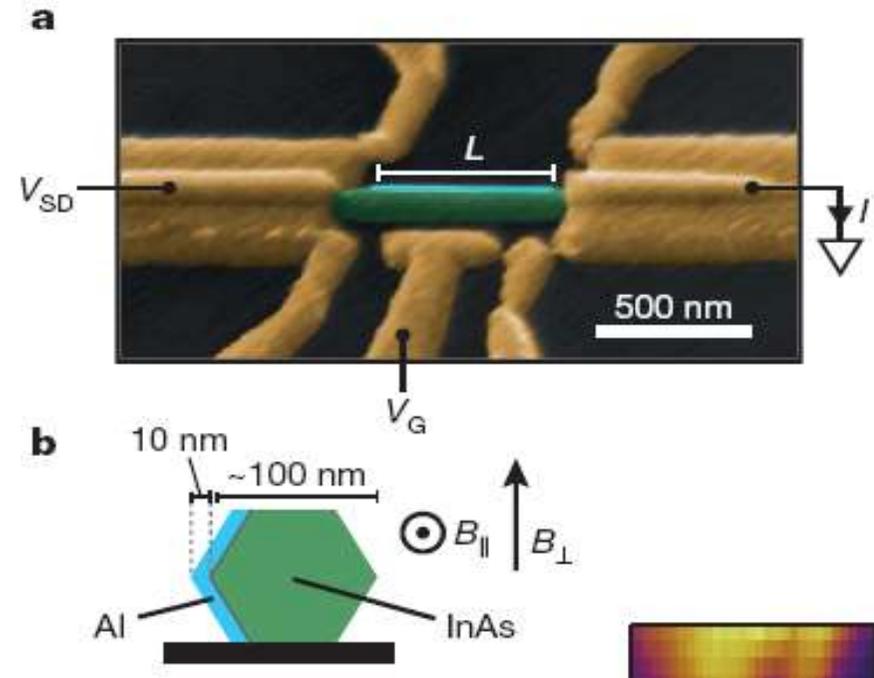
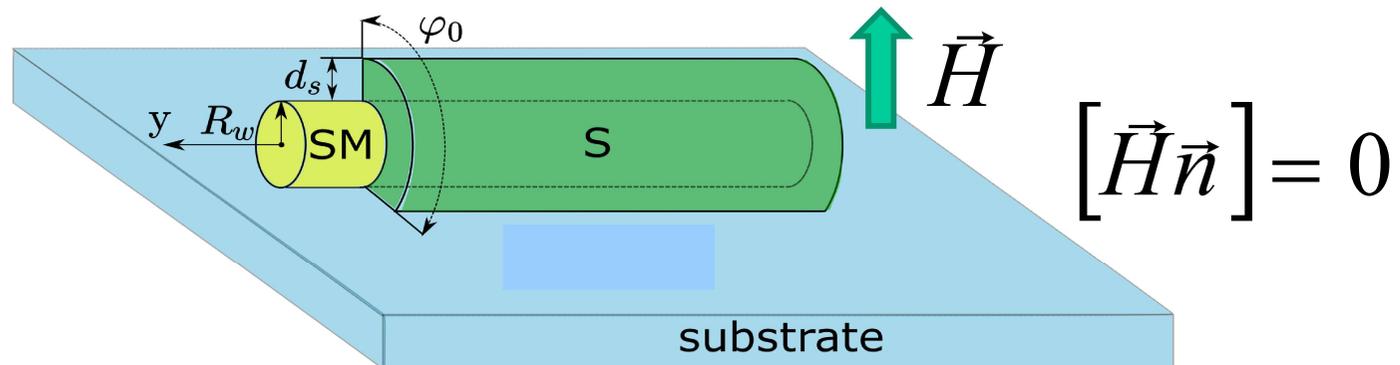
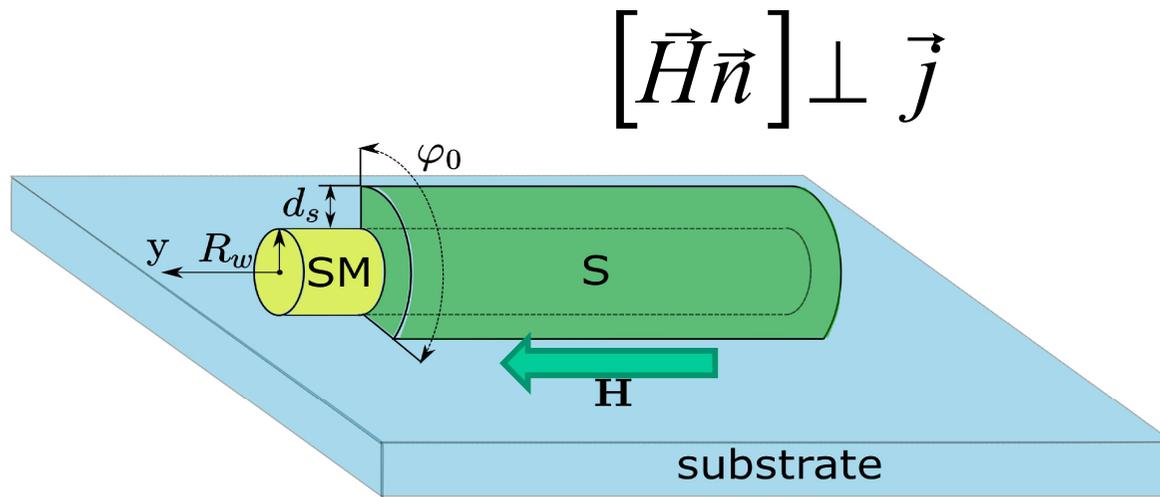
2D



3D

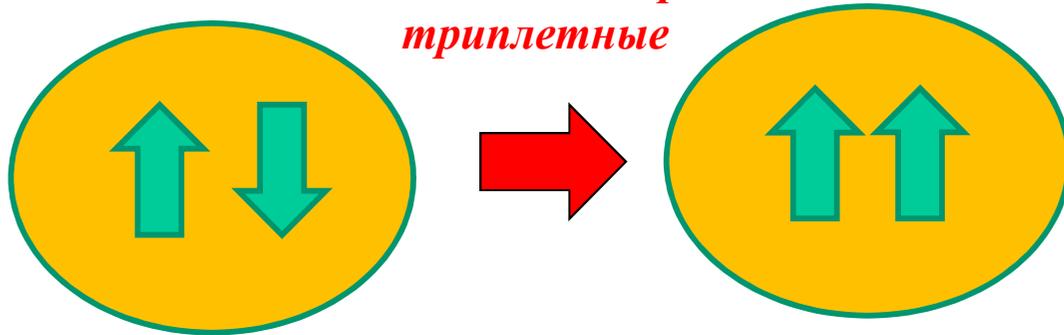


Examples: Systems with induced superconducting order

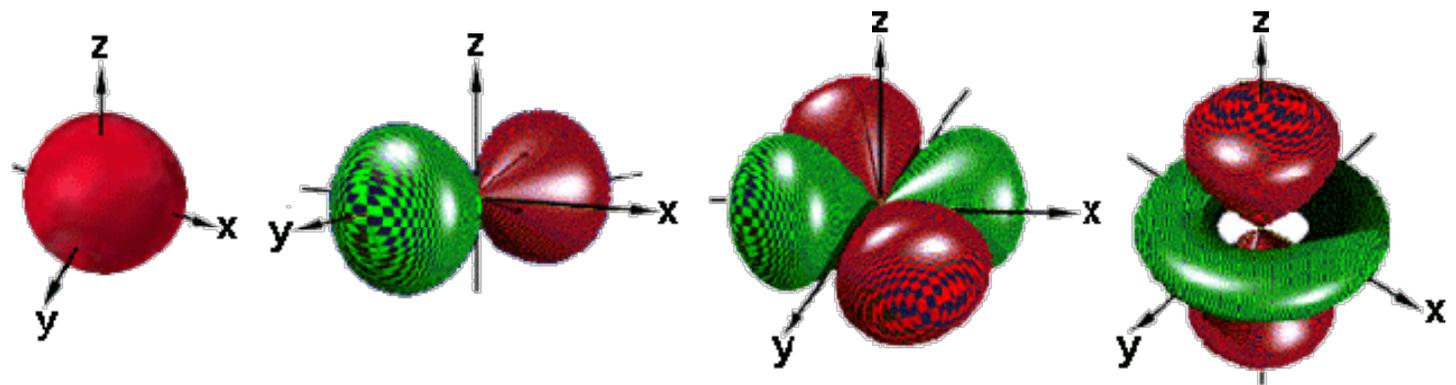


**Пример превращения куперовских пар в полупроводниковых проводах.
Цель: управление свойствами электронных состояний, создание кубитов и т.д.**

*Превращение
синглетных пар в
триплетные*



Превращение s- пар в p- пары



Феноменологическая теория сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау

Параметр порядка $\Psi = \sqrt{\frac{n_s}{2}} e^{i\varphi}$ ← Плотность
сверхпроводящих
электронов

Для медленных изменений параметра порядка в пространстве:

Свободная энергия $F = F_n + \int \left(\frac{\hbar^2}{4m} |\nabla \Psi|^2 + a |\Psi|^2 + \frac{b}{2} |\Psi|^4 \right) dV$

Свободная энергия
нормального состояния $a = \alpha(T - T_c)$

Равновесный параметр порядка в
однородном сверхпроводнике

$$|\Psi|^2 = \frac{\alpha(T_c - T)}{b}$$

Включаем магнитное поле:

Требование калибровочной инвариантности

$$\nabla\Psi \rightarrow \nabla\Psi - \frac{2ie}{\hbar c} \vec{A}\Psi$$

?

$$\tilde{F} = F_n + \int \left(\frac{\hbar^2}{4m} \left| \left(\nabla - \frac{2ie}{\hbar c} \vec{A} \right) \Psi \right|^2 + a|\Psi|^2 + \frac{b}{2}|\Psi|^4 + \frac{\vec{B}^2}{8\pi} - \frac{\vec{B}\vec{H}}{4\pi} \right) dV$$

Энергия магнитного поля

При заданном поле \vec{H}

Вариация функционала

по Ψ^*  **Уравнение Гинзбурга-Ландау**

по \vec{A}  **Уравнение Максвелла**

$$\vec{j} = \frac{e\hbar}{m} |\Psi|^2 \left(-\frac{2e}{\hbar c} \vec{A} + \nabla \varphi \right)$$

$$\vec{j} = -\frac{e^2 n_s}{mc} \vec{A}$$

Уравнение Лондонов

**Феноменологическая теория
сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау.
Как учесть влияние обменного поля?**

$$F = F_n + \int \left(\frac{\hbar^2}{4m} |\nabla \Psi|^2 + a |\Psi|^2 + \frac{b}{2} |\Psi|^4 \right) dV$$

$m < 0$ 

Но! Тогда для устойчивости надо добавлять высшие производные!

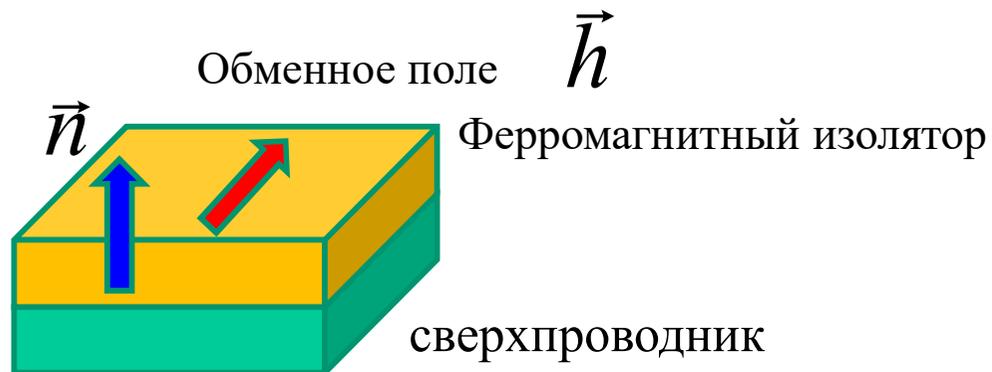
**Феноменологическая теория
сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау.
Как учесть влияние спин-орбитального
взаимодействия?**

$$f(\mathbf{r}) = a|\psi|^2 + \frac{\hbar^2}{4m} |\hat{\mathbf{D}}\psi|^2 + \frac{b}{2} |\psi|^4 + \frac{(\text{rot}\mathbf{A})^2}{8\pi} \\ + \frac{\hbar^2}{4m} (\mathbf{n} \times \mathbf{h}) \cdot [\psi^* (\varepsilon \hat{\mathbf{D}} + \eta \hat{\mathbf{D}}^3) \psi + \text{h.c.}].$$

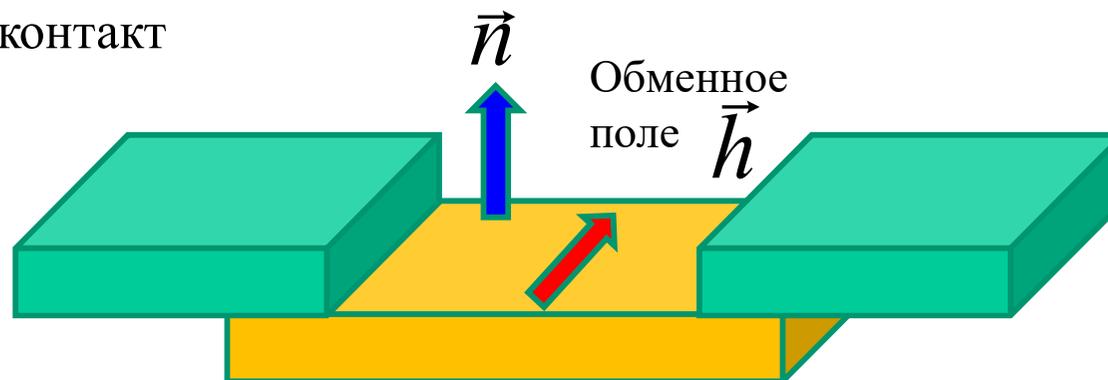
Примеры. Бислой сверхпроводник - ферромагнетик

Сверхтекучая
скорость

$$\vec{v}_s \sim [\vec{n} \vec{h}]$$



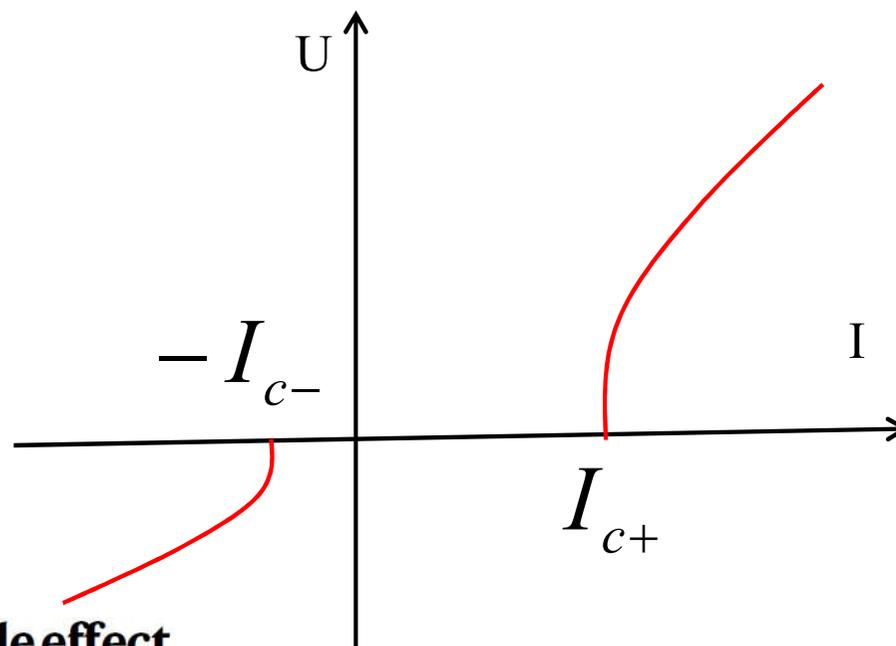
Примеры. Фи-контакт



$$j = j_c \sin(\varphi - \varphi_0)$$

$$\varphi_0 \sim [\vec{n} \vec{h}] d$$

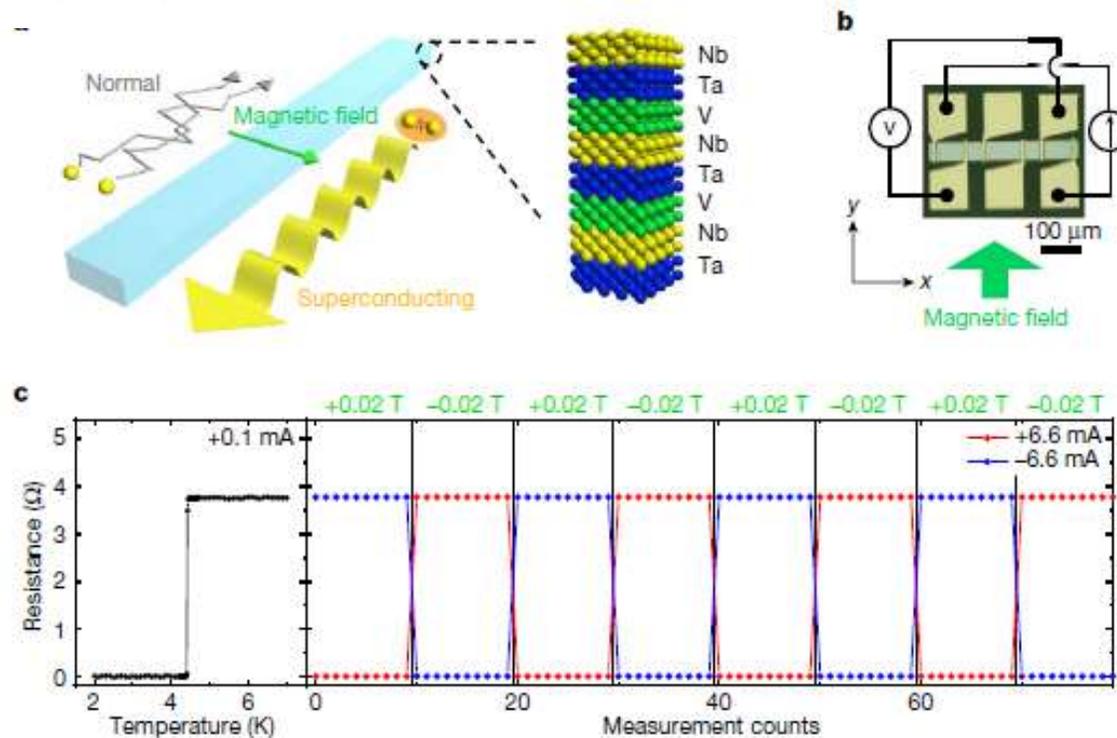
Сверхпроводящий диод



Observation of superconducting diode effect

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2590-4>
 Received: 14 March 2020

Fuyuki Ando¹, Yuta Miyasaka¹, Tian Li¹, Jun Ishizuka², Tomonori Arakawa^{3,4}, Yoichi Shiota¹,
 Takahiro Moriyama¹, Youichi Yanase² & Teruo Ono^{1,4}✉



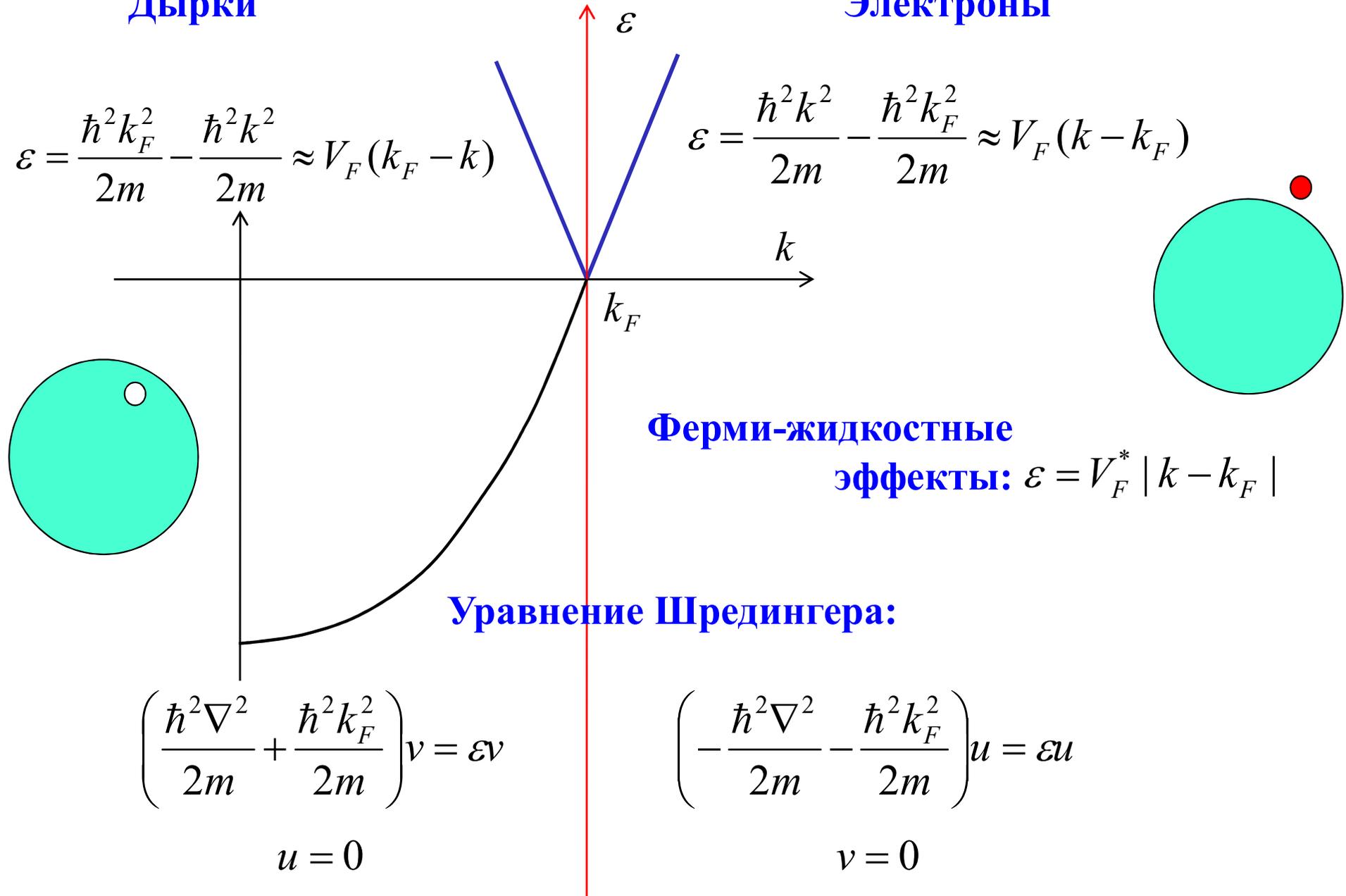
Электроны и дырки в нормальном металле

Дырки

Электроны

$$\varepsilon = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} - \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \approx V_F (k_F - k)$$

$$\varepsilon = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} - \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} \approx V_F (k - k_F)$$



Ферми-жидкостные

эффекты: $\varepsilon = V_F^* |k - k_F|$

Уравнение Шредингера:

$$\left(\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} \right) v = \varepsilon v$$

$$u = 0$$

$$\left(-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} - \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} \right) u = \varepsilon u$$

$$v = 0$$

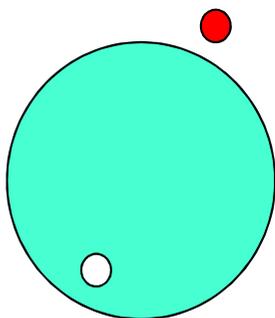
Электроны и дырки в нормальном металле

$$\langle 0 | \hat{a}_q \hat{a}_k^+ | 0 \rangle \neq 0$$

- вероятность рассеяния электрона из состояния $\hat{a}_k^+ | 0 \rangle$ в состояние $\hat{a}_q^+ | 0 \rangle$

Электроны и дырки в сверхпроводнике. Аномальные средние.

$\langle 0 | \hat{a}_q^+ \hat{a}_k^+ | 0 \rangle \neq 0$ - вероятность рассеяния электрона из состояния $\hat{a}_k^+ | 0 \rangle$
в дырочное состояние $\hat{a}_q | 0 \rangle$



2 связанных уравнения Шредингера = уравнения
Боголюбова

$$\left(-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} - \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} \right) u + \Delta v = \varepsilon u$$
$$\left(\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} \right) v + \Delta u = \varepsilon v$$

Some useful details:

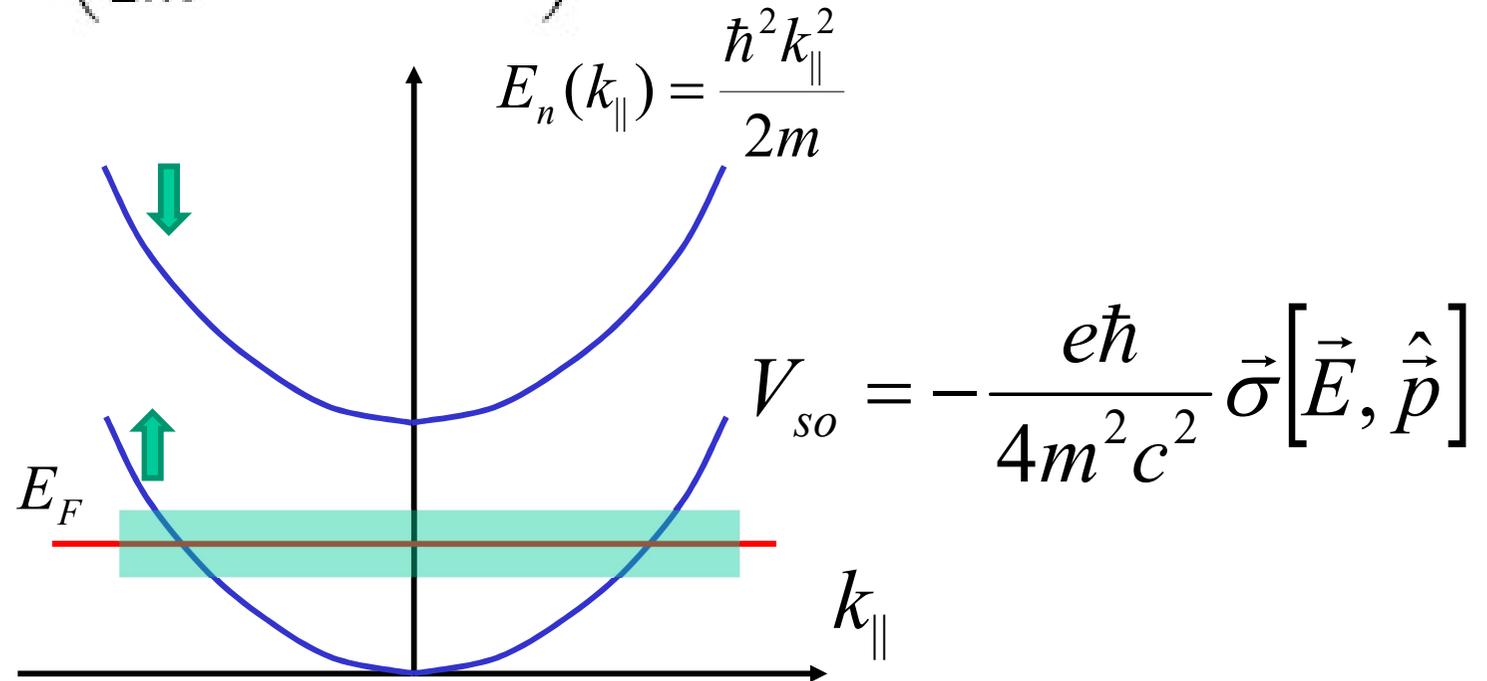
Magnetic field, order parameter phase, gauge invariance, elastic scattering, spin


$$\left(\begin{array}{l} -\frac{\hbar^2 \left(\nabla - \frac{ie}{\hbar c} \vec{A} \right)^2}{2m} - \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} + V_{so} + U \\ \frac{\hbar^2 \left(\nabla + \frac{ie}{\hbar c} \vec{A} \right)^2}{2m} + \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m} - V_{so} - U \end{array} \right) \begin{array}{l} u + \Delta v = (\varepsilon + \beta \vec{H} \vec{\sigma}) u \\ v + \Delta^* u = (\varepsilon + \beta \vec{H} \vec{\sigma}) v \end{array}$$

$$V_{so} = -\frac{e\hbar}{4m^2 c^2} \vec{\sigma} \left[\vec{E}, \hat{p} \right]$$

Nanowires in magnetic field and strong spin-orbit interaction

$$H = \left(\frac{p^2}{2m} + up\sigma_x - \mu \right) \tau_z - B\sigma_z + \Delta\tau_x$$



Теория возмущений по взаимодействию спиновых подзон

$$H \simeq \left(\frac{p^2}{2m} - \mu \right) \tau_z - \frac{up}{B} \Delta\tau_x.$$

Вопросы и задания:

Вопрос 1.

Почему магнитное поле разрушает сверхпроводимость?

Вопрос 2.

Что такое эффект близости?

Задача.

Цилиндр из ферромагнитного изолятора, намагниченный вдоль своей оси, помещен в сверхпроводник. Найти распределение токов и полей в рамках лондоновского приближения. Обсудить связь с эффектом Ааронова-Бома. Как изменится ответ если цилиндр металлический и есть эффект близости? Как повлияет на ответ взаимодействие Рашба на интерфейсе ферромагнетик – сверхпроводник?