Перемешивание спина электрона и его орбитального движения

А.В. Щепетильников

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия

Долгопрудный, 13 октября 2020г.

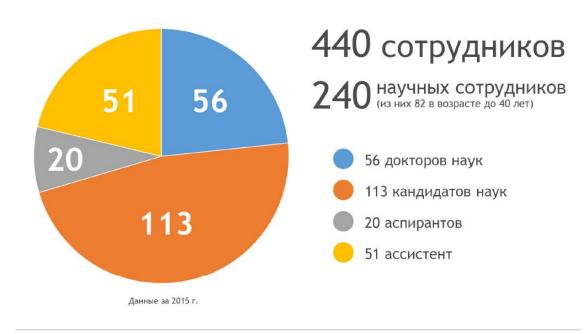
План

- □ Общие слова
- □ Концепция спина
- □ Спин-орбитальное взаимодействие
- □ 2D системы
- Спинтроника
- Релаксация спина
- Спиновый эффекта Холла
- □ Наши эксперименты
- Заключение

ИФТТ РАН







За 2015 год сотрудниками института опубликовано 320 статей в ведущих международных и отечественных научных журналах: Science, Nature, Physical Review, Scientific Reports, Applied Physics Letters, Physica, Surface Science, Physica Status Solidi, Успехи физических наук, Письма в ЖЭТФ и другие.

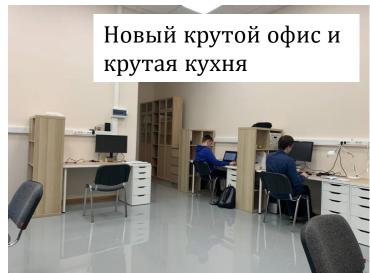


Наша лаборатория



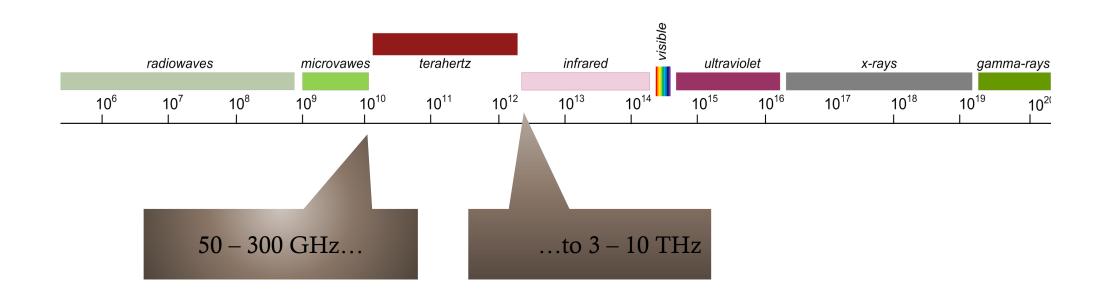
Наша группа



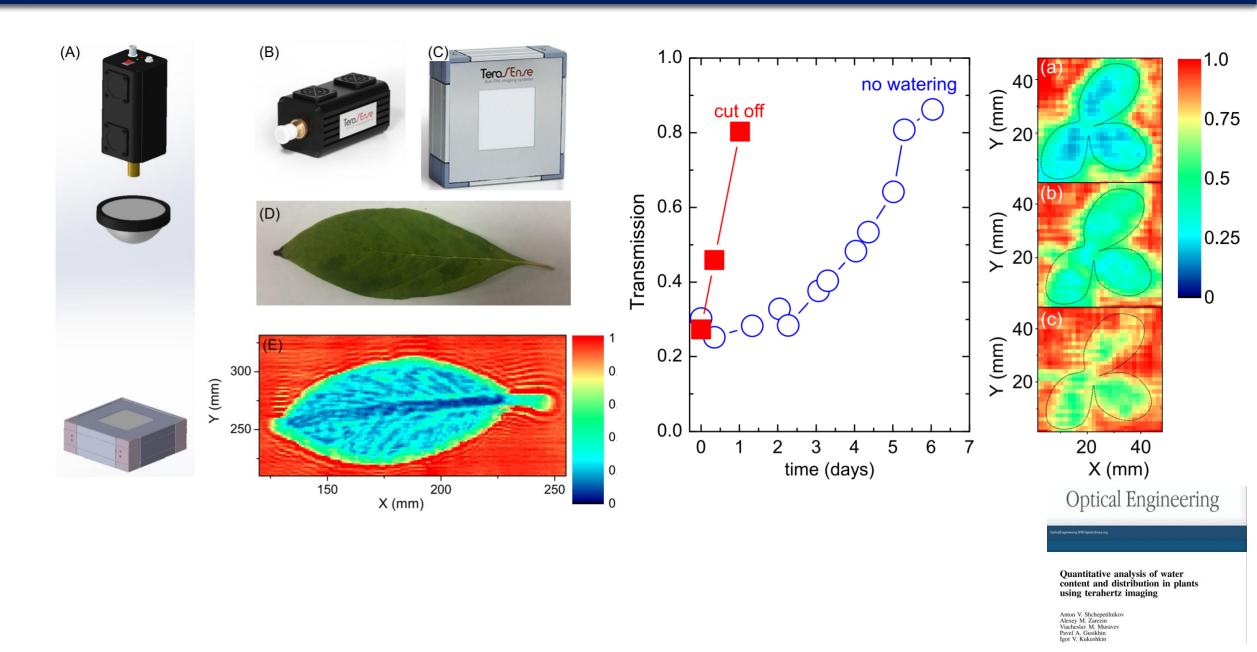




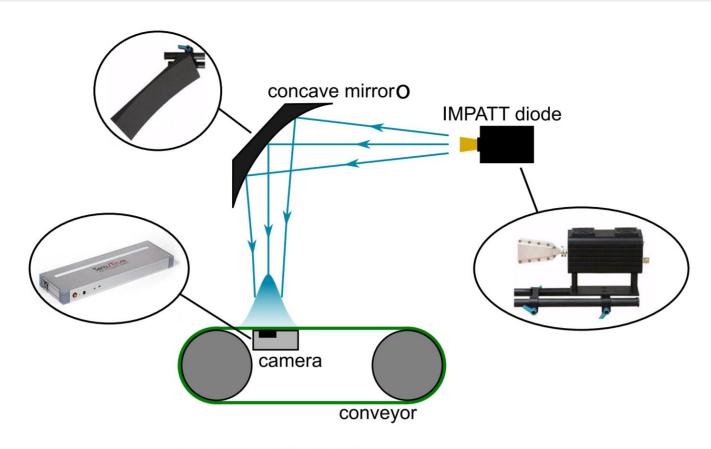
Инновации



Применение: сельское хозяйство



Применение: безопасность



International Journal of Infrared and Millimeter Waves (2020) 41:655-664 https://doi.org/10.1007/s10762-020-00692-4

New Ultra-Fast Sub-Terahertz Linear Scanner for Postal Security Screening



A. V. Shchepetilnikov¹ · P. A. Gusikhin¹ · V. M. Muravev¹ · G. E. Tsydynzhapov¹ · Yu. A. Nefyodov¹ · A. A. Dremin¹ · I. V. Kukushkin²

X (mm)

Применение: безопасность

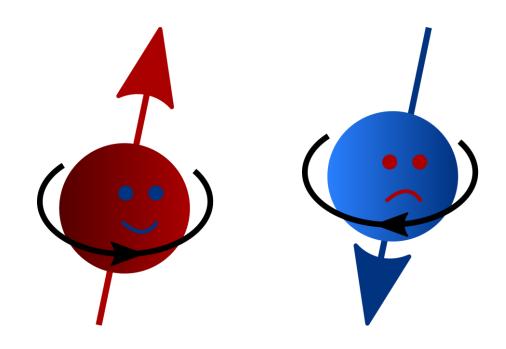






Концепция спина

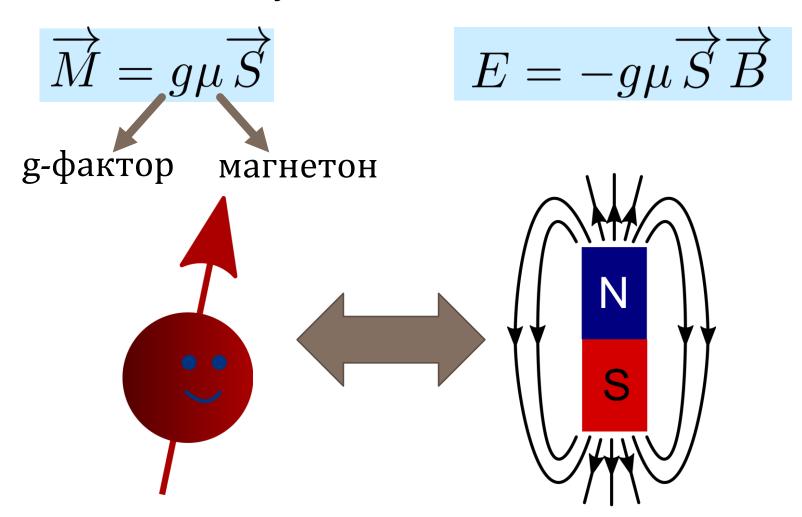
Спин – собственный момент импульса "стрелочка" – направление момента



Спин имеет квантовую природу и не связан с вращением частицы как целого

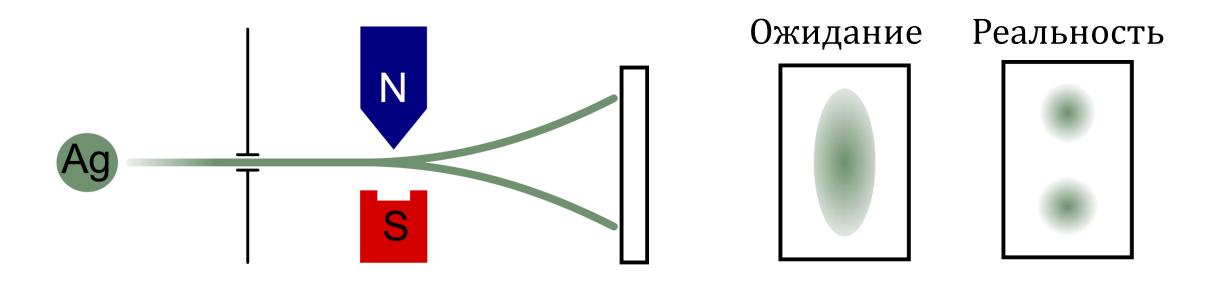
Спин и магнитный момент

Со спином **S** связан магнитный момент **M**, взаимодействующий с магнитным полем



Эксперимент Штерна Герлаха

В неоднородном магнитном поле на частицу с магнитным моментом **М** действует сила пропорциональная **М**



Спин квантуется, т.е. может принимать лишь дискретный набор значений

Спин и статистика

Симметрия волновой функции и статистика частиц зависит от величины их спина

$$S=1/2,3/2,5/2...$$

S=0,1,2,3...

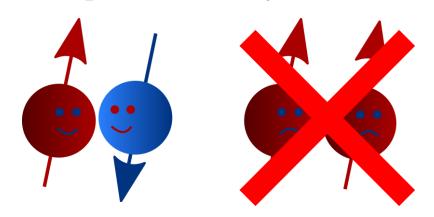
статистика Ферми-Дирака

$$n = \frac{1}{e^{(E-\mu)/kT} + 1}$$

статистика Бозе-Эйнштейна

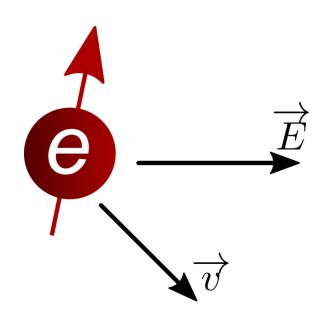
$$n = \frac{1}{e^{(E-\mu)/kT} - 1}$$

принцип Паули

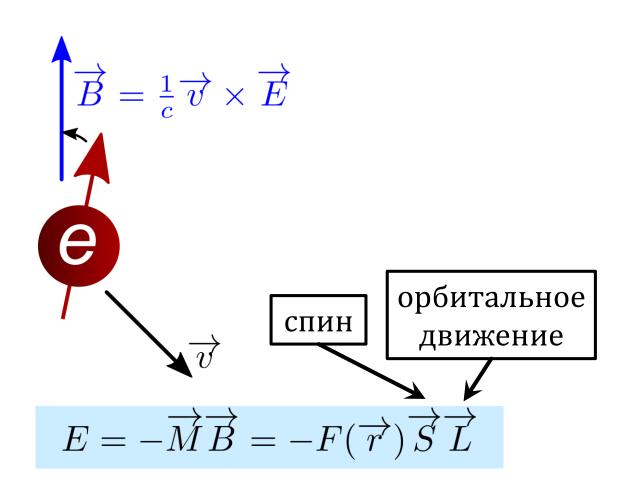


Спин-орбитальное взаимодействие: "голый" е

в лабораторной системе отсчета

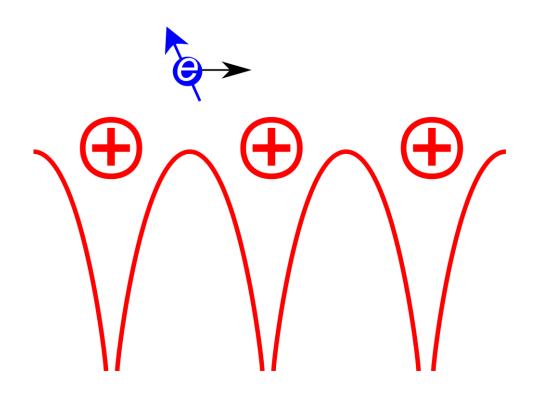


в системе отсчета самого электрона



Спин-орбитальное взаимодействие: кристалл

В кристалле электрон движется в сильном электрическом поле => большая спин-орбита



Какие кристаллы подходят?

инверсия пространства

$$E_{\uparrow}(k) = E_{\downarrow}(-k)$$

инверсия времени

$$E_{\uparrow}(k) = E_{\uparrow}(-k)$$



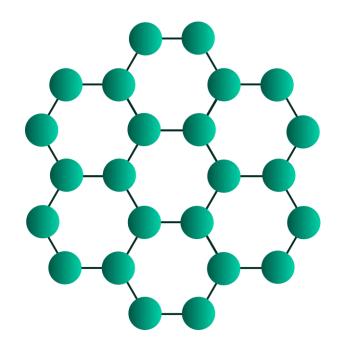
Нужна асимметрия!!!

2D системы

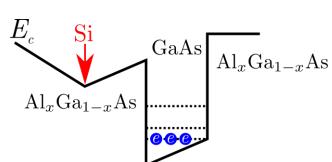
Нужно запереть электрон по одной из оси координат в узком слое

тонкие пленки

Пример: графен и подобные материалы

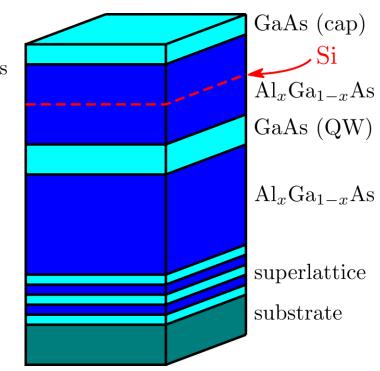


полупроводниковые гетероструктуры



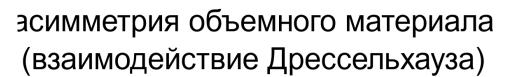
$$E = E_n + \frac{h^2 k_x^2}{2m^*} + \frac{h^2 k_y^2}{2m^*}$$
$$E_n \sim \frac{n^2}{L^2}$$

Типичная ширина квантовых ям 5-50 nm



Спин-орбитальное взаимодействие: 2D системы





$$H_D = \beta(\sigma_x k_x - \sigma_y k_y)$$

структурная асимметрия ямы (взаимодействие Рашбы)

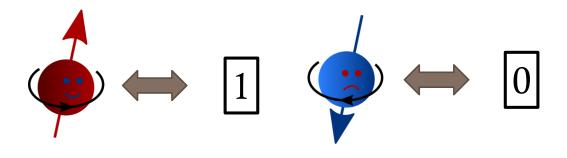
$$H_R = \alpha(\sigma_x k_y - \sigma_y k_x)$$

асимметрия связей на интерфейсе



Спинтроника

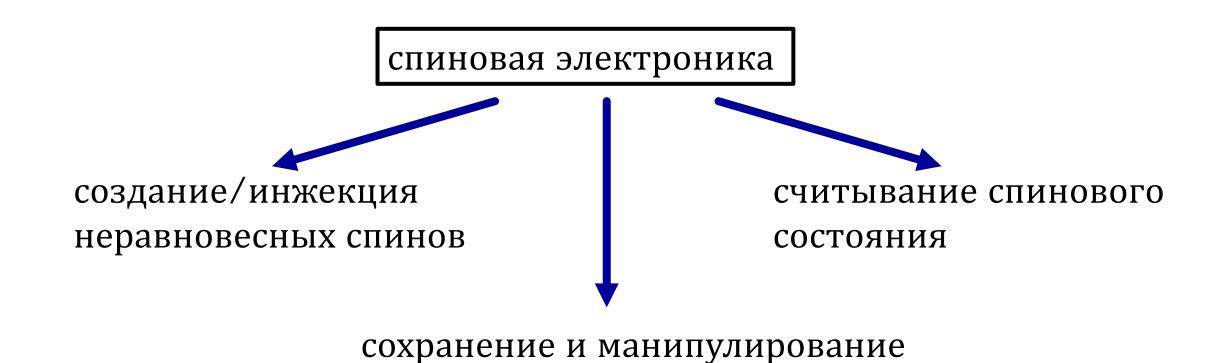
Спинтроника – электроника, в основе которой использование разных спиновых состояний электрона для хранения информации



Ключевые преимущества:

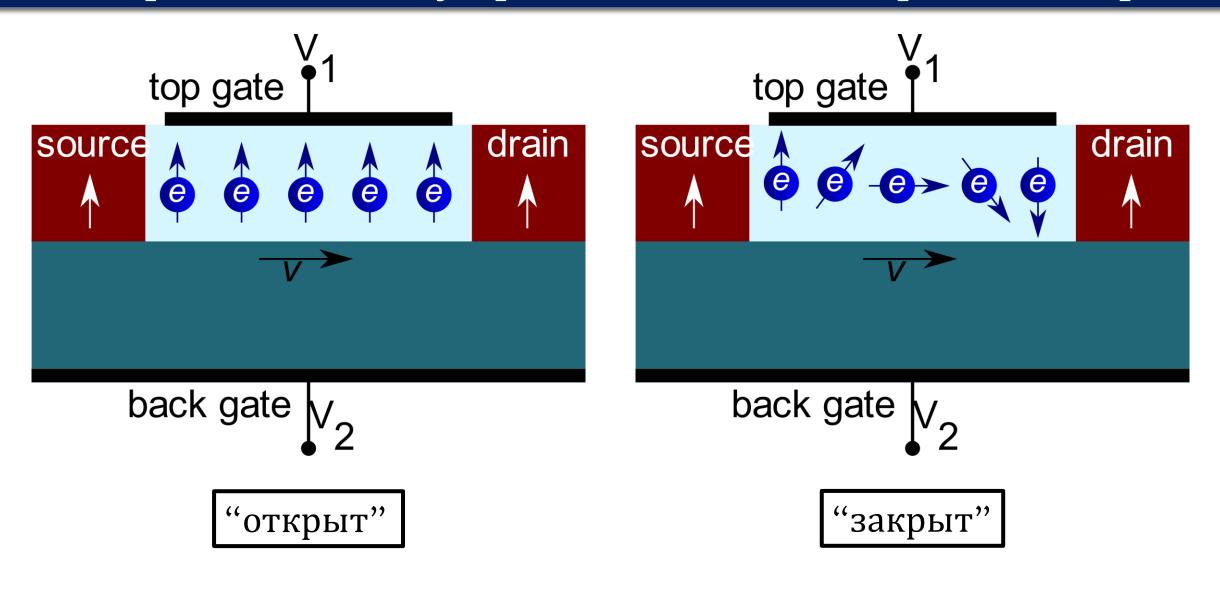
- энергоэффективность
- быстродействие
- большая емкость

Спинтроника



неравновесными спинами

Спинтроника: полупроводниковый транзистор

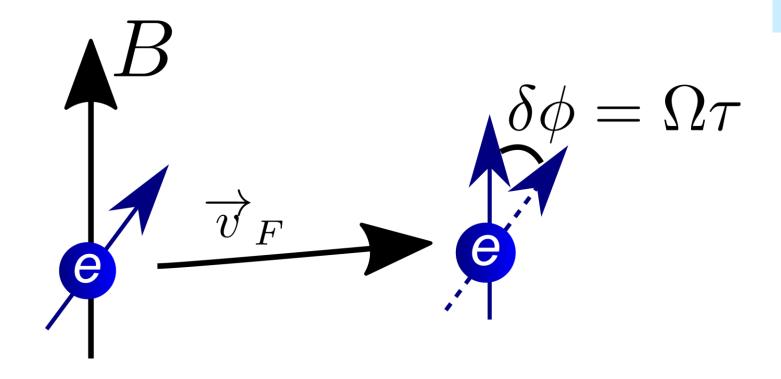


Datta, Das, 1990

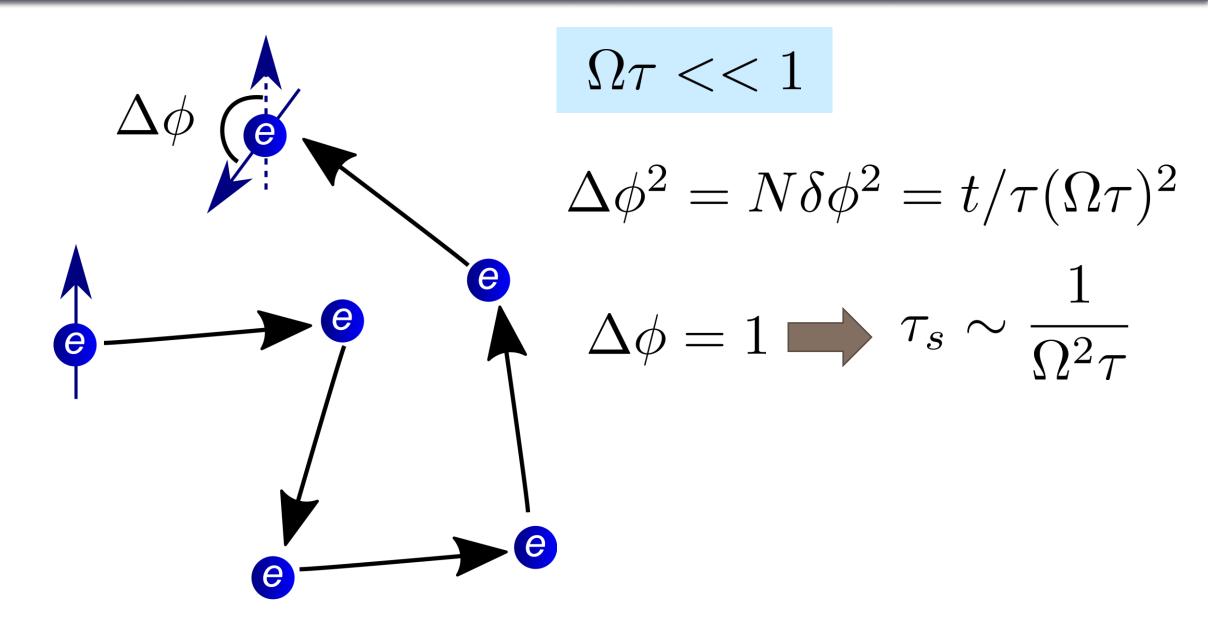
Спиновая релаксация: баллистический режим

$$\Omega \sim B = \frac{1}{c}v \times E$$

$$\Omega \tau >> 1$$
 $\tau_s \sim 1/\Omega$

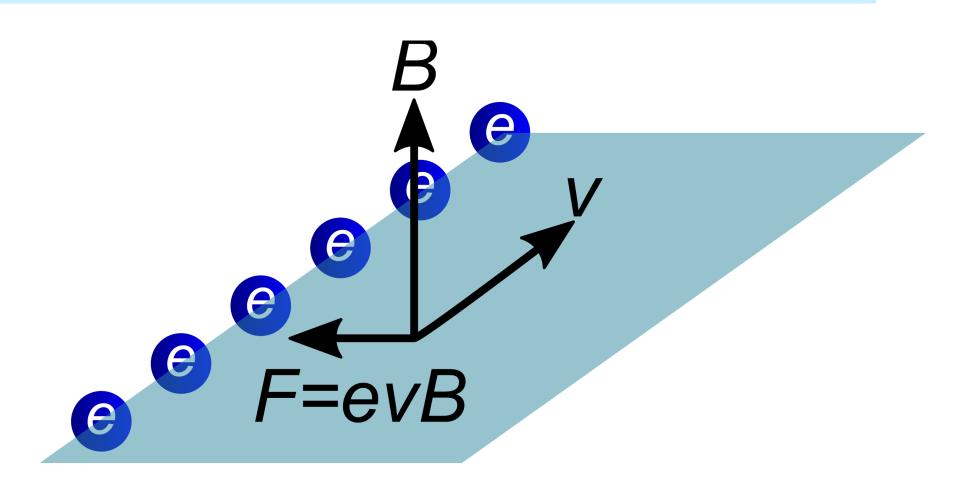


Спиновая релаксация: диффузионный режим

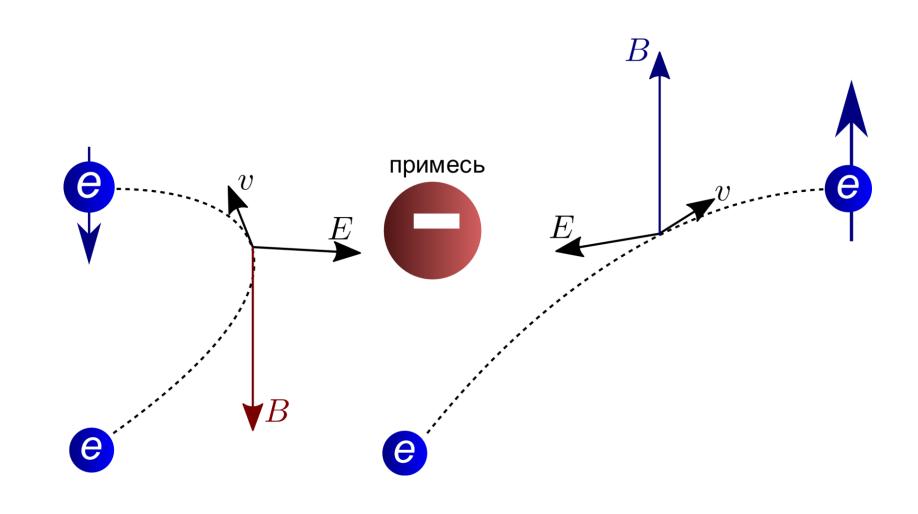


Эффект Холла

При прохождении через образец постоянного тока возникает дополнительный ток, перпендикулярный исходному



Спиновый эффект Холла: эффект Мотта

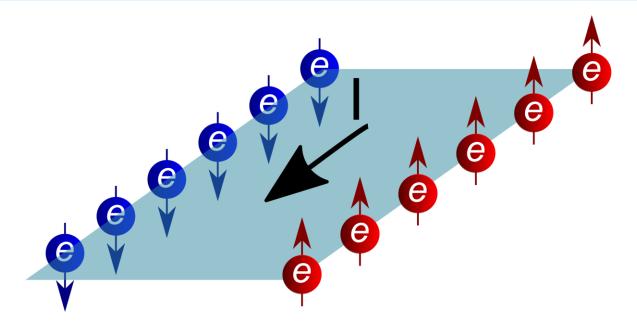


Спиновый эффект Холла

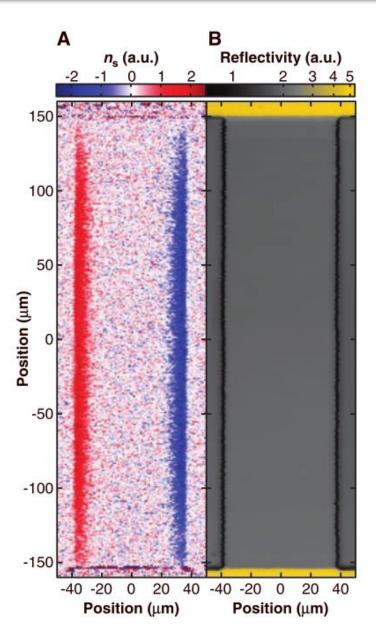
При прохождении через образец постоянного тока возникает спиновый ток, перпендикулярный току зарядов (впервые *М.И.Дьяконов*, *В.И.Перель*, *Письма в ЖЭТФ* 13, 657 (1971))



На границе образца возникает разная спиновая поляризация электронов



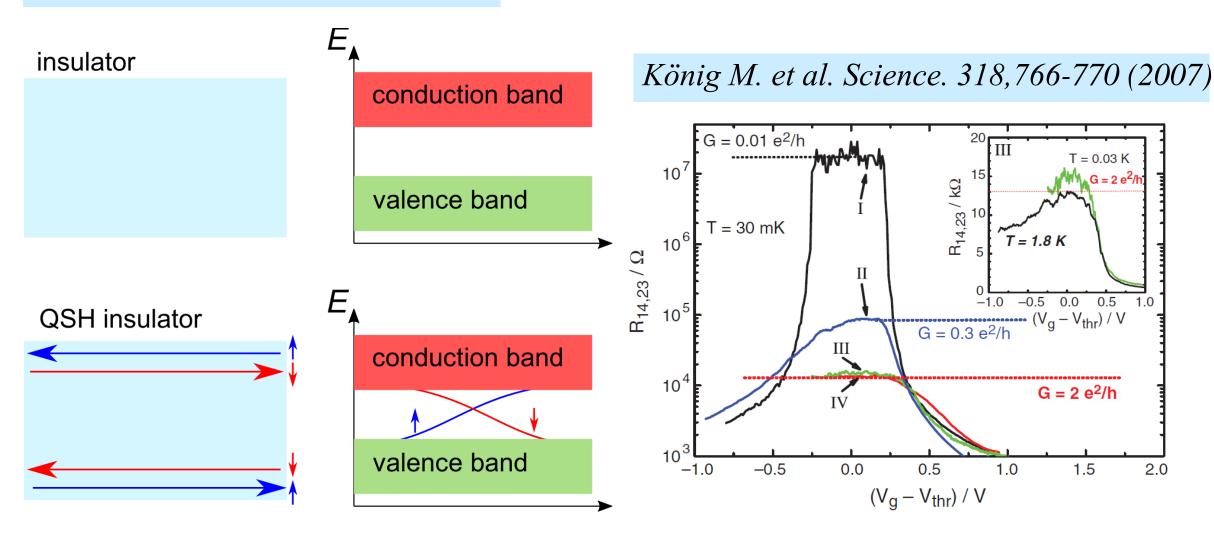
Спиновый эффект Холла: эксперимент



Y.Kato et al., Science **306**, 1910 (2004).

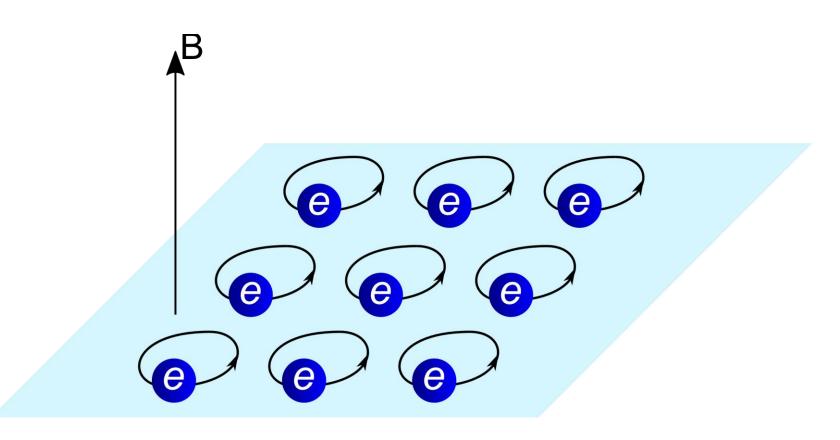
Квантовый спиновый эффект Холла

B. A. Bernevig, S.-C. Zhang, Phys. Rev. Lett. 96, 106802 (2006).

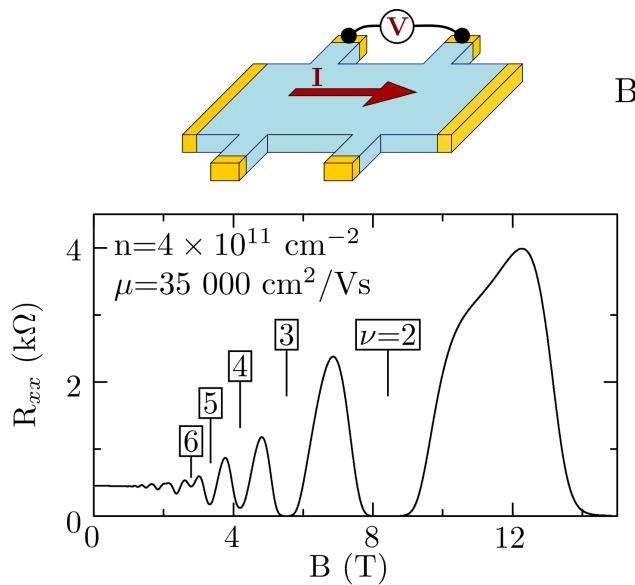


Квантовый эффект Холла

В сильном магнитном поле е вращаются по циклотронным орбитам, при этом их спектр заквантован в уровне Ландау



Квантовый эффект Холла

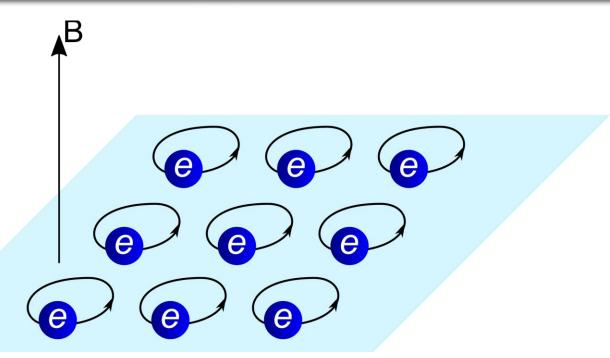


В больших магнитных полях:

Фактор заполнения:

$$\nu = \frac{n_s h}{2eB}$$

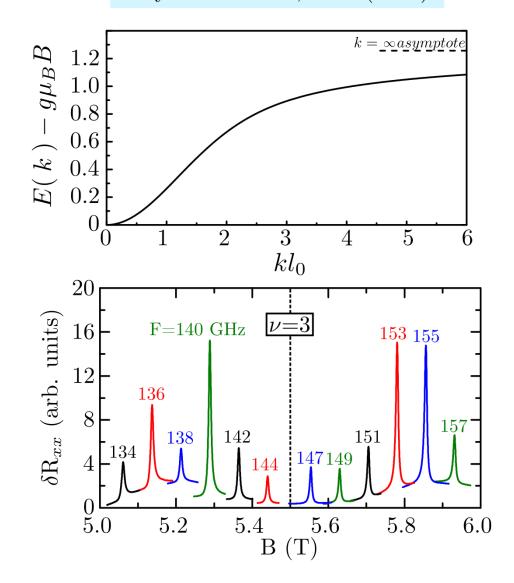
Квантовый эффект Холла



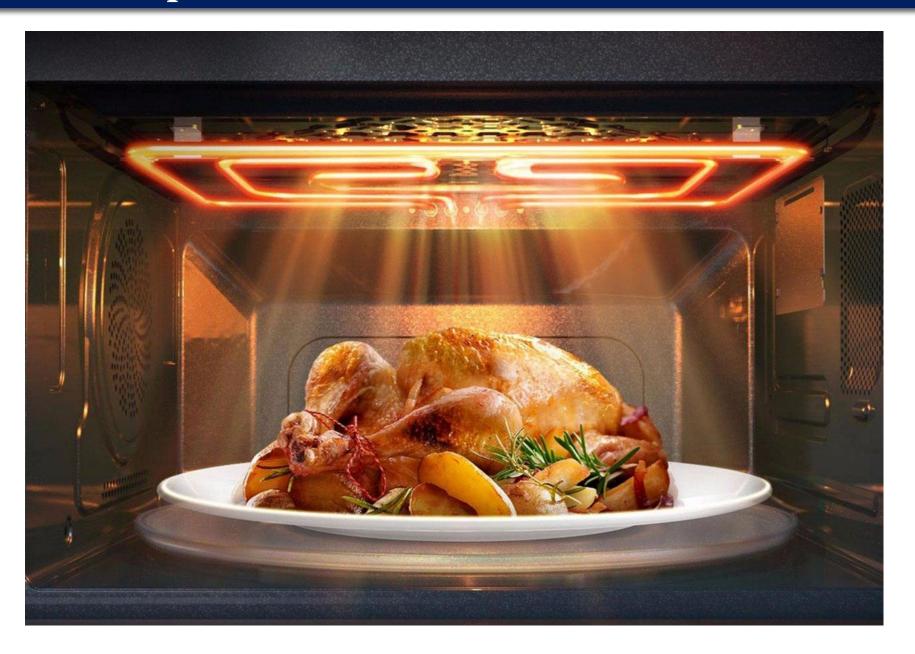
$$H_D = \beta(\sigma_x k_x - \sigma_y k_y)$$

$$B >> 0: E_s = g_0 \mu_B B + \frac{\beta^2 \frac{1}{l_B^2}}{\hbar \omega_C} (2N+1)$$
 $\Longrightarrow g = \frac{E_s}{\mu_b B} = g_0 + A \frac{2N+1}{B}$

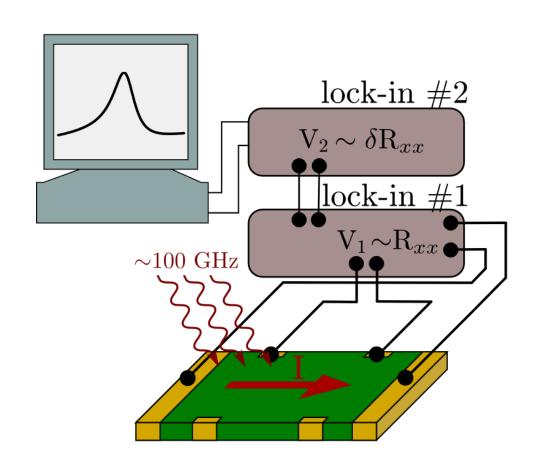
 $\nu = 1$ E_Z spin exciton C. Kallin and B. I. Halperin Phys. Rev. B **30**, 5655 (1984)

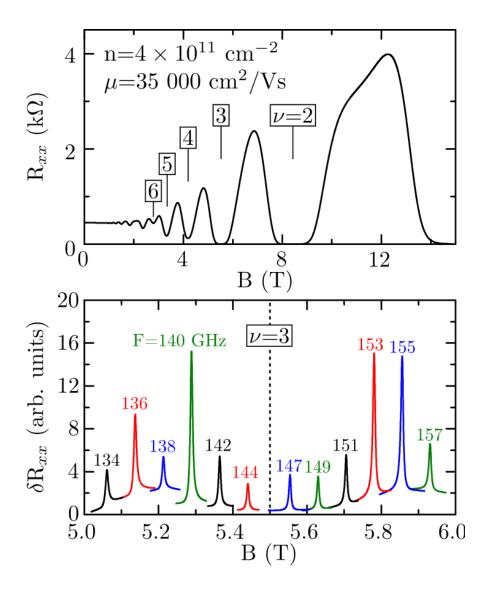


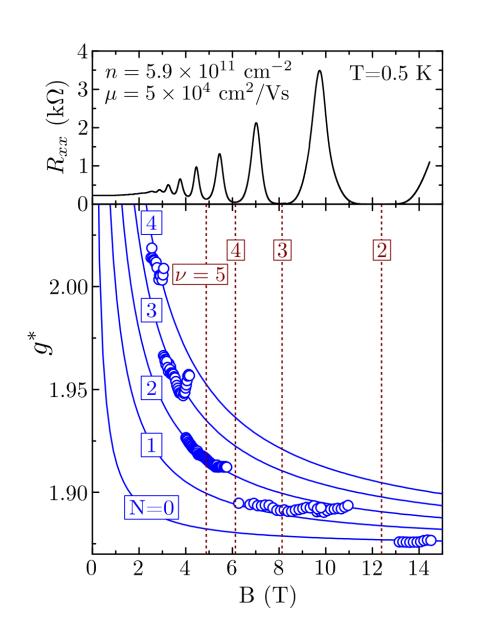
ЭПР: детектирование

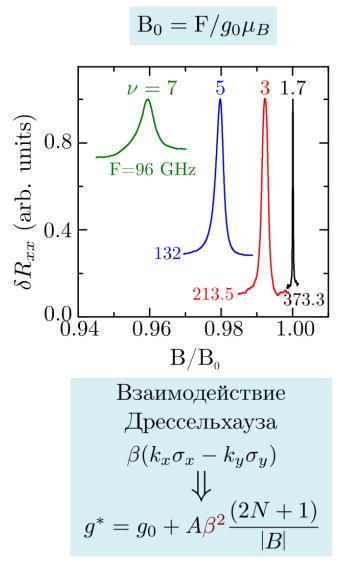


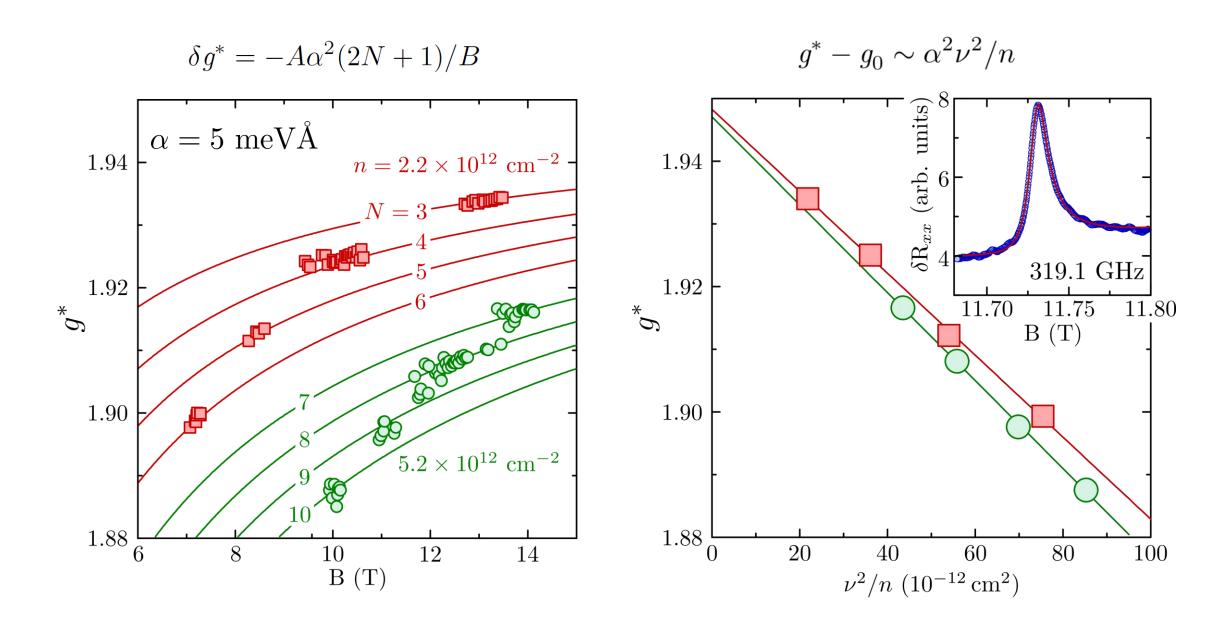
ЭПР: детектирование

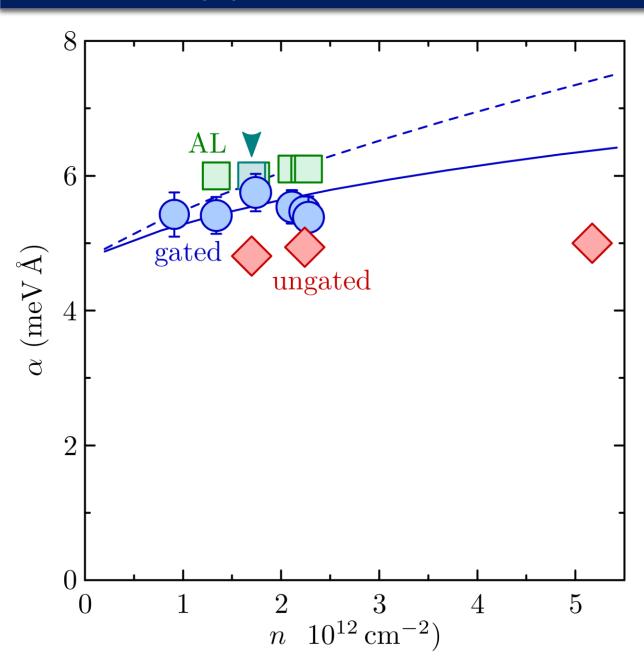












PHYSICAL REVIEW APPLIED 18, 024037 (2022)

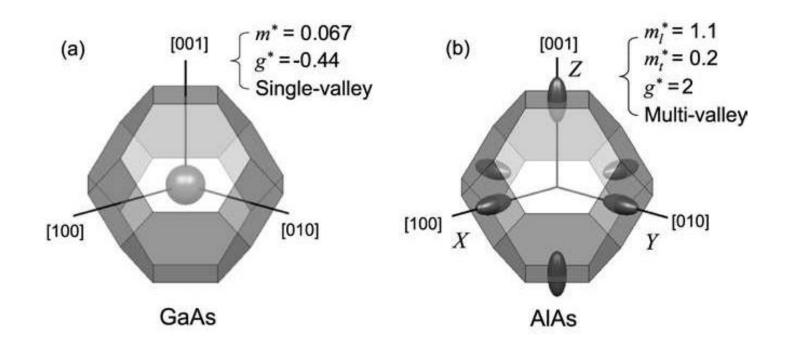
Spin-Orbit Interaction in $GaN/Al_xGa_{1-x}N$ Heterojunctions Probed by Electron Spin Resonance

A.V. Shchepetilnikov[®], ^{1,2,*} A.R. Khisameeva, ¹ V.V. Solovyev[®], ¹ A. Großer, ³ T. Mikolajick, ^{3,4} S. Schmult, ⁴ and I.V. Kukushkin¹

¹Institute of Solid State Physics RAS, 142432 Chernogolovka, Moscow District, Russia ²National Research University Higher School of Economics, 101000 Moscow, Russia ³NaMLab gGmbH, Nöthnitzer Straße 64 a, 01187 Dresden, Germany

⁴ Electrical and Computer Engineering, Institute of Semiconductors and Microsystems, TU Dresden, Nöthnitzer Straße 64, 01187 Dresden, Germany

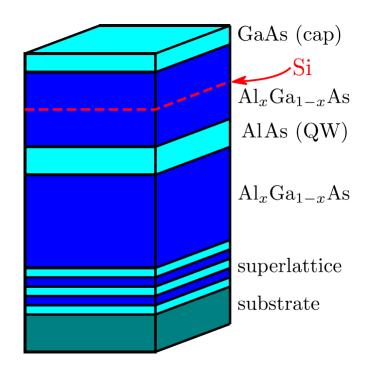
(Received 2 February 2022; revised 13 June 2022; accepted 11 July 2022; published 12 August 2022)

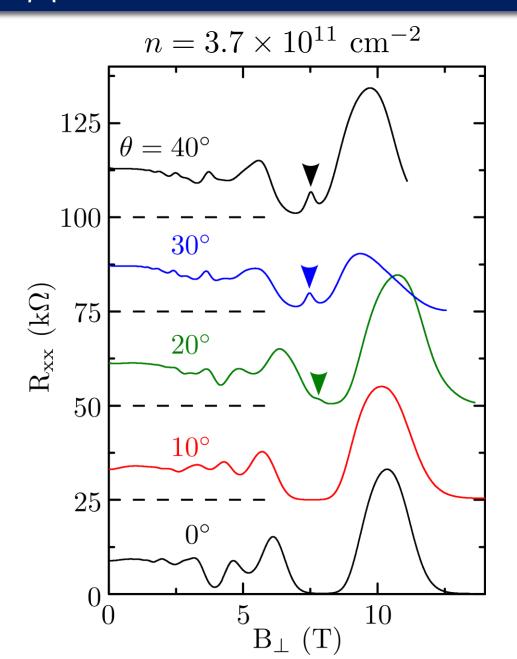


Долинная степень свободы ⇔ спиновая степень свободы

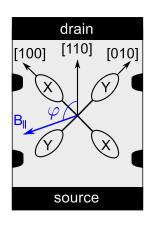
Наличие ненулевого строенного напряжения —> ненулевое изоспиновое расщепление — дополнительный масштаб энергии в режиме КЭХ.

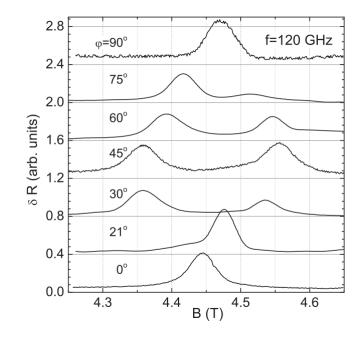
Широкая квантовая яма (16 нм) => заселены два эквивалентные долины.



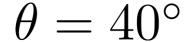


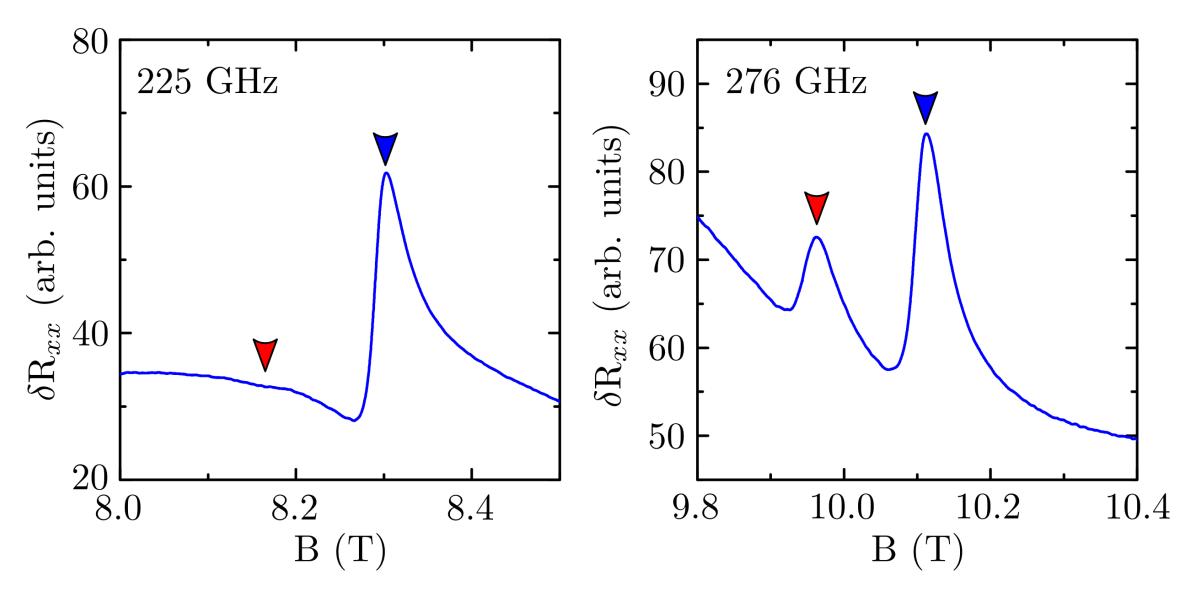
Данный пик может быть как спиновым, так и изоспиновым. Как узнать?

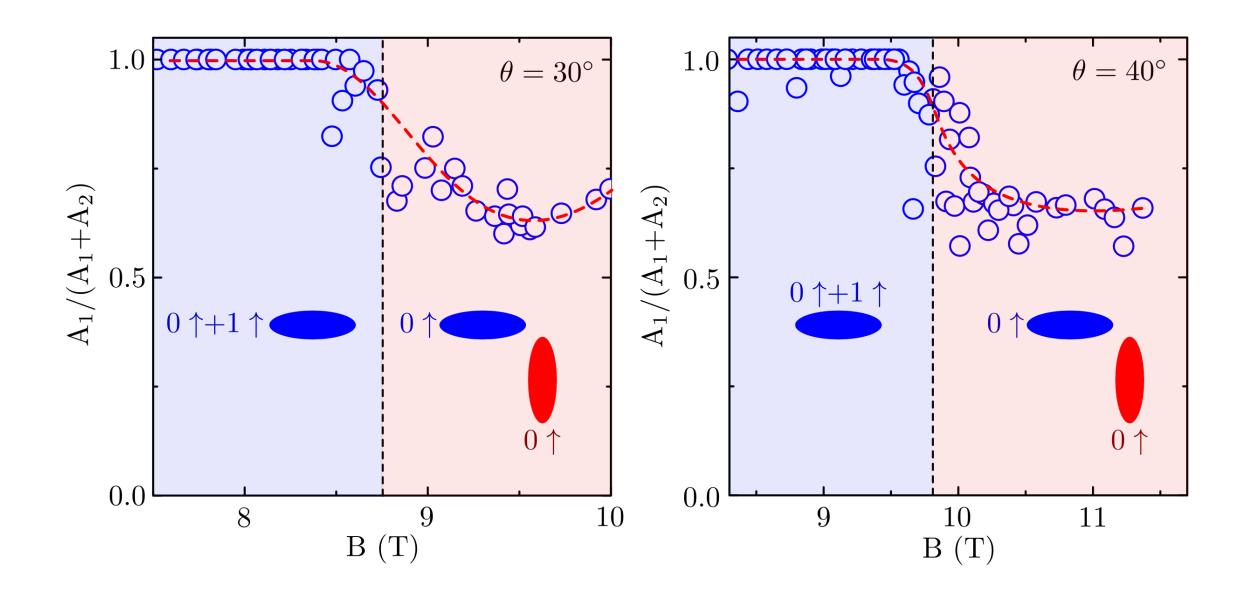




При определенном положении плоскостной компоненты магнитного поля - спиновые резонансы с каждой из долин видны независимо.







Спасибо за внимание