

Перенос энергии и спина в разбавленных магнитных полупроводниках

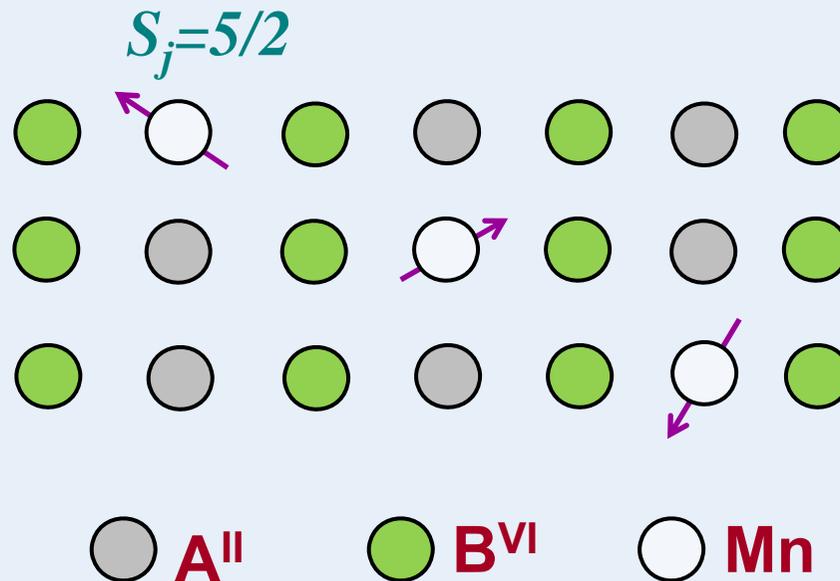
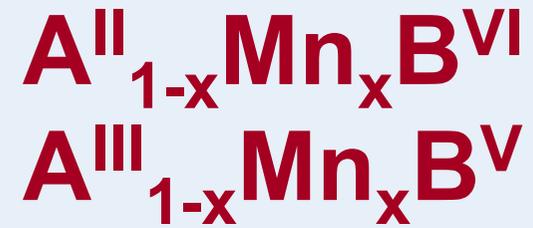


Ю.Г. Кусраев
ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

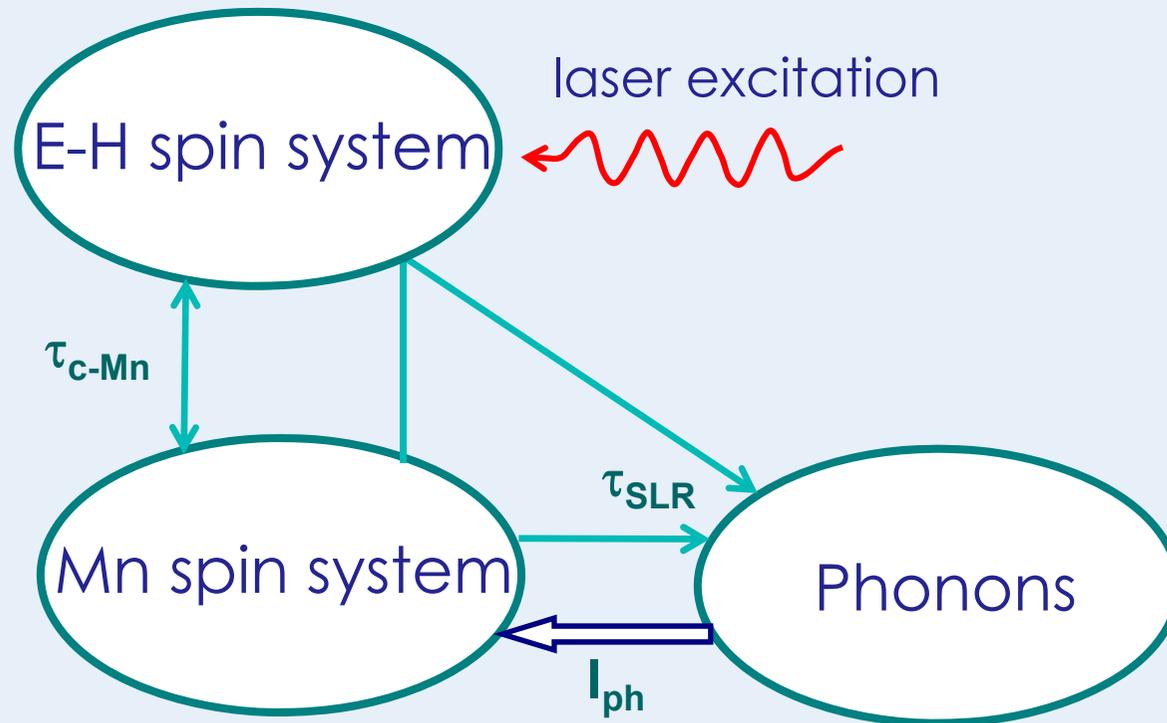
План доклада:

- ❑ Разбавленные магнитные полупроводники
- ❑ Магнитные поляроны в объемных полупроводниках и низкоразмерных структурах
- ❑ Оптическая ориентация магнитных поляронов и спиновая динамика
- ❑ Отрицательная циркулярная поляризация ФЛ трионов

Diluted magnetic semiconductors



Spin interactions in carrier - Mn spin system



Spin interactions in carrier - impurity spin system of DMS give rise to extraordinary magneto-optical and spin phenomena:

- ❖ Giant spin splitting of band (exciton) states (GSS)
- ❖ Giant Faraday rotation
- ❖ Magnetic polaron formation
- ❖ Short spin relaxation time of electrons
- ❖ Spin glass and ferromagnetic phase transitions

Diluted magnetic semiconductors:

I. Exchange interaction between band electrons and magnetic ions

$$H_{ex} = -a \sum_j |\Psi(R_j)|^2 \vec{S}_e \vec{S}_j = -\vec{S}_e \cdot \left(a \sum_j |\Psi(R_j)|^2 \vec{S}_j \right) \propto \mu_B g \vec{S}_e \cdot \vec{B}_{eff} \rightarrow (\vec{B} + \vec{B}_{eff})$$

Here S_e is spin of band electron and S_j is magnetic ion spin in site j . Band electron interacts with a large number of magnetic ions -the mean field approximation is valid.

$$a \sum_j |\Psi(\vec{R}_j)|^2 \vec{S}_j \sim \langle S_z(B) \rangle, \quad B \parallel z$$

$$B_{eff}(B) \gg B$$

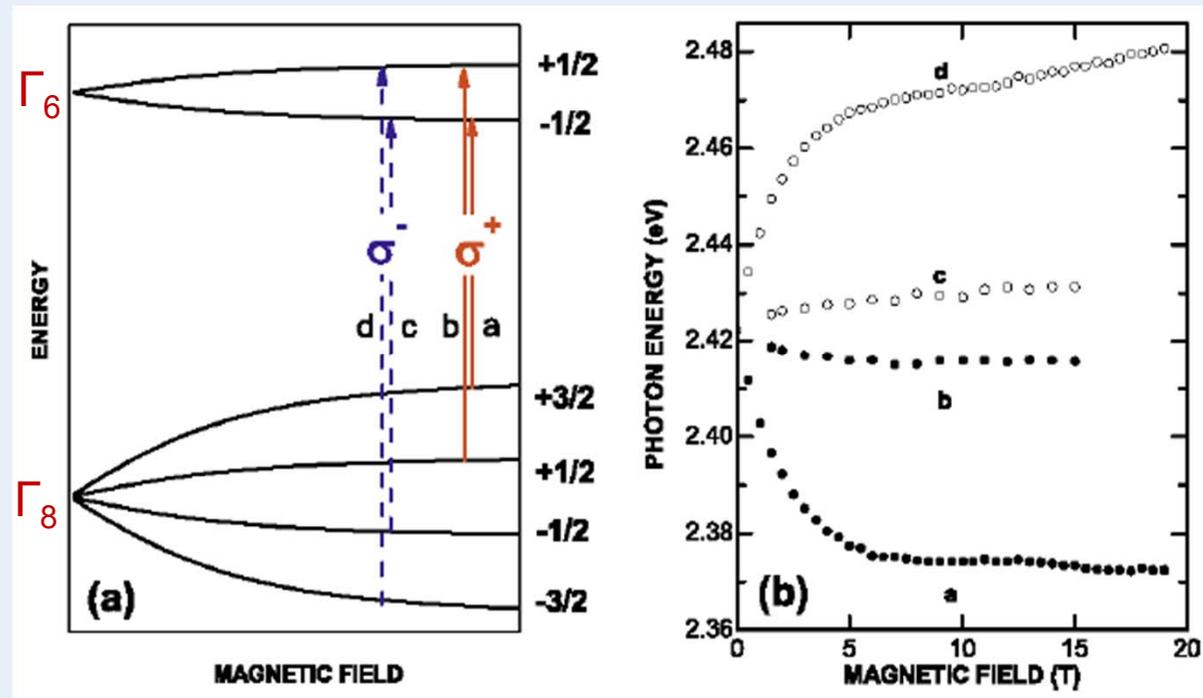
$$\Delta E_c = \alpha N_0 x \langle S_z \rangle S_{ez}, \quad \Delta E_v = \beta N_0 x \langle S_z \rangle S_{hz};$$

$\langle S_z(B) \rangle$ - mean value of Mn spin

$$Cd_{1-x}Mn_xTe: \quad \alpha N_0 \approx 0.22 eV, \quad \beta N_0 \approx -0.88 eV$$

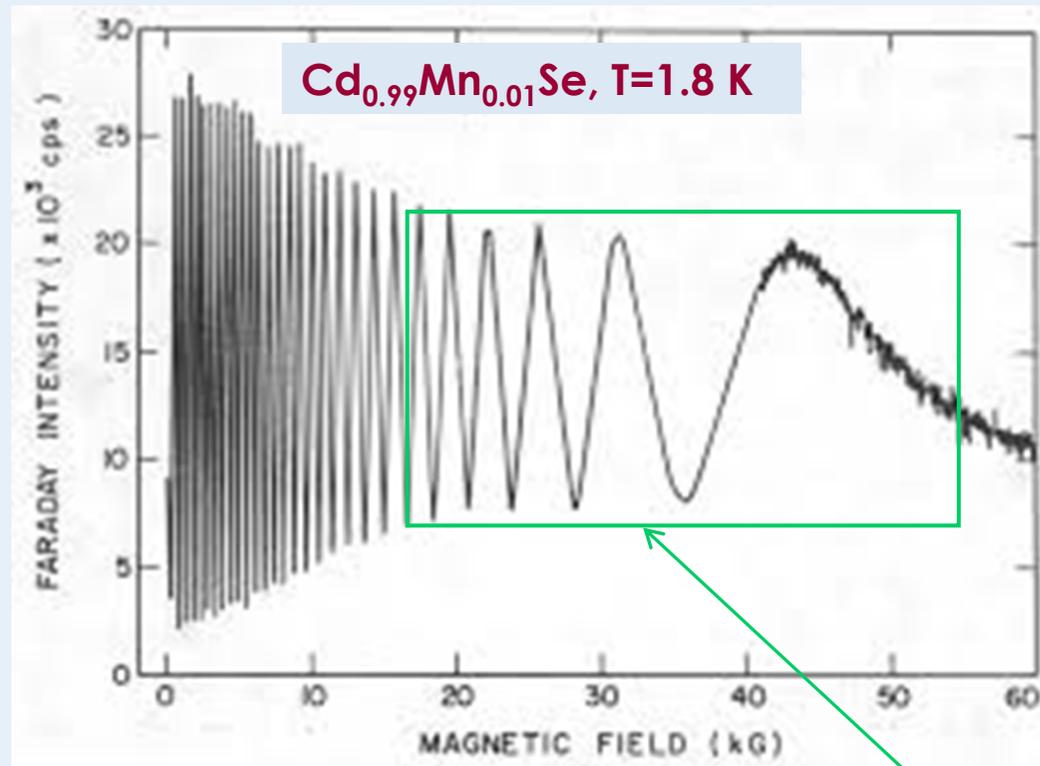
$$Zn_{1-x}Mn_xSe: \quad \alpha N_0 \approx 0.26 eV, \quad \beta N_0 \approx -1.31 eV$$

Giant spin splitting



a) A schematic picture of the spin splitting of the top of the valence band (Γ_8) and the bottom of the conduction band (Γ_6) for $Al_{1-x}Mn_xBVI$ alloy in a magnetic field. b) Experimental transition energies in a $Zn_{0.95}Mn_{0.05}Te$ sample, as a function of the applied field, in the Faraday configuration J. Furdyna, J. Appl. Phys. **64**, R29 (1988)

Giant Faraday rotation



Saturation of magnetization $M=M_0B_{5/2}(5\mu_B gB/kT)$

Faraday rotation of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ by simple measurements of transmitted light intensity vs. magnetic field. Sample is placed between two crossed polarizers

J. K. Furdyna, Diluted magnetic semiconductors
J. Appl. Phys. 64, R29–R64 (1988)

II. Exchange interaction between magnetic ions

$$H_{ex} = \sum_{i,j} J_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j$$

This interaction is antiferromagnetic

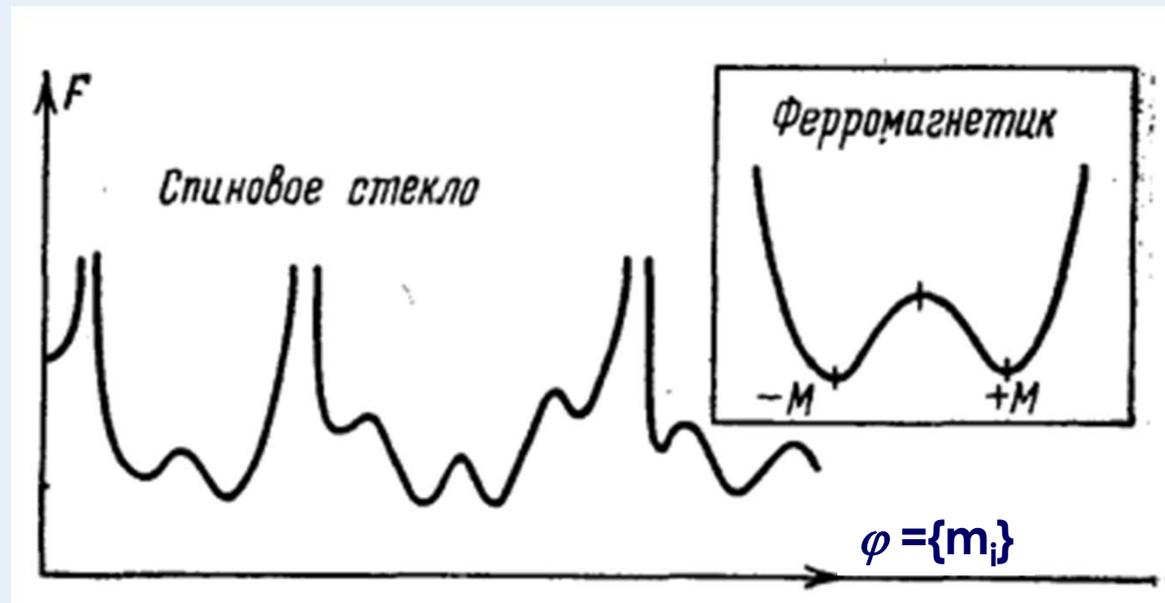


Due to the disorder in the arrangement of spins, the system undergoes a phase transition into a spin glass state

$$\text{At } T > T_{SG} \quad \langle \vec{S}_i(t) \rangle = 0, \quad \text{at } T < T_{SG} \quad \langle \vec{S}_i(t) \rangle \neq 0$$

$\langle \vec{S}_i(t) \rangle$ – average spin value at the site i

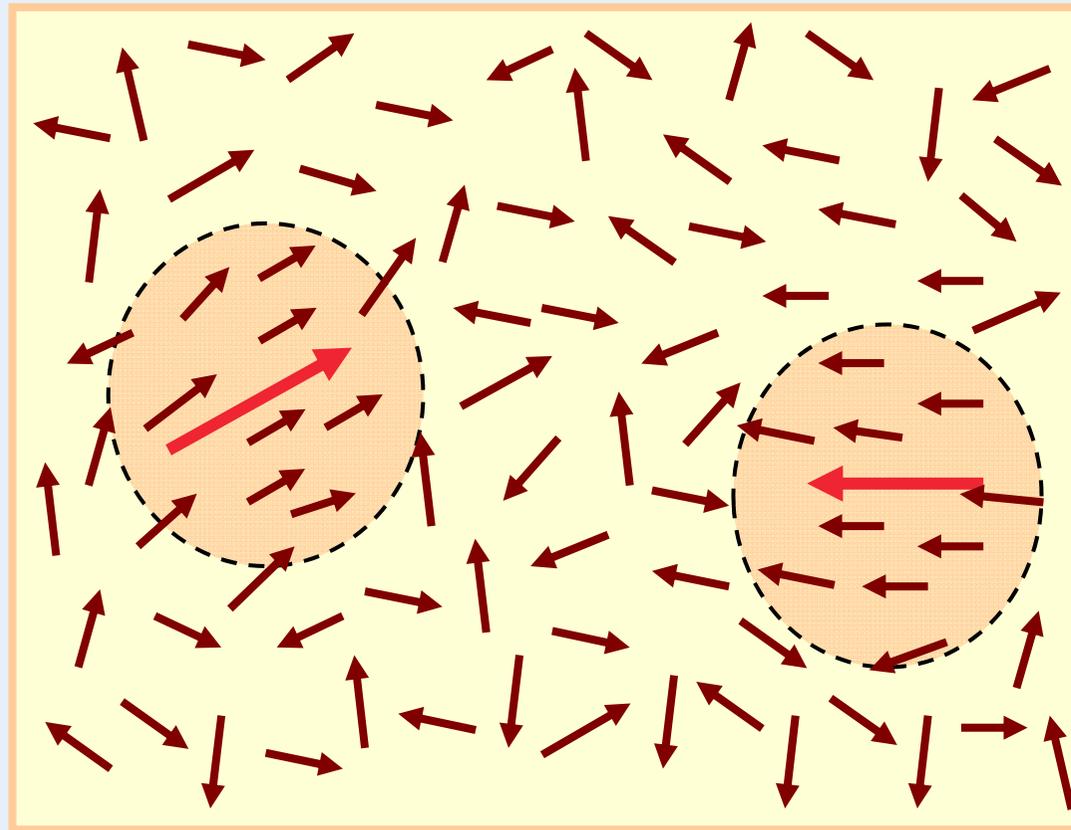
Спиновые стекла



Свободная энергия $F(\{m_i\})$ как функция спиновой конфигураций $\varphi = \{m_i\}$

Спиновые стекла как модельные системы для нейронных сетей. В. Кинцель. УФН, **152**, 123 (1987)

Magnetic polarons in DMS



← carrier spin, S_e

→ Mn - spins, S_i

$$\vec{M}_P = \sum_{i=1}^N \vec{m}_i$$

$$H_{ex} = a \sum_j |\Psi(R_j)|^2 \vec{S}_j \vec{S}_e \sim \vec{B}_{ex} \vec{M}_P, \quad \vec{B}_{ex} \propto \frac{a}{V} \vec{S}_e$$

MP is characterized by the magnetic moment $M_p \sim xN_0g\mu_B B_l(g\mu_B IB_{ex}/kT)$ and energy $E_p = M_p B_{ex}$: typical values are $M_p \sim 10 - 100\mu_B$, and $E_p \sim 1-100$ meV

Parameters of Magnetic Polaron in DMS

E_{MP} - energy of magnetic polaron (0.1 – 50 meV)

B_{ex} – exchange field of localized hole (0.1 – 10 Tesla)

M_p - magnetic moment of polaron (1 – 400 μ_B)

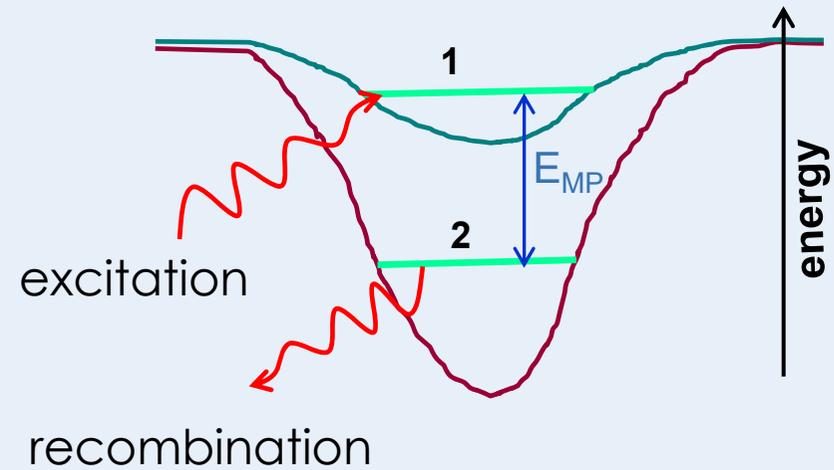
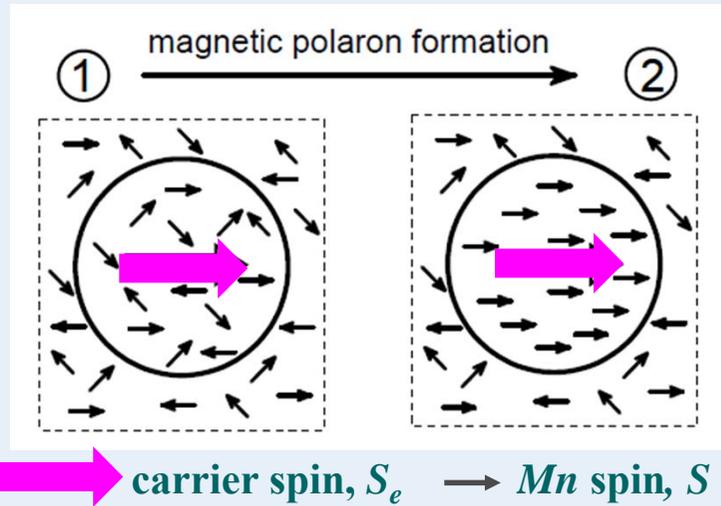
$$E_{MP} = M_p \vec{B}_{ex}$$

$$\vec{B}_{ex} = a \sum_i |\Psi(R_j)|^2 \vec{J}_h \propto \frac{a}{V} \vec{J}_h$$

$$M_p = V \chi B_{ex}$$

Magnetic polaron formation

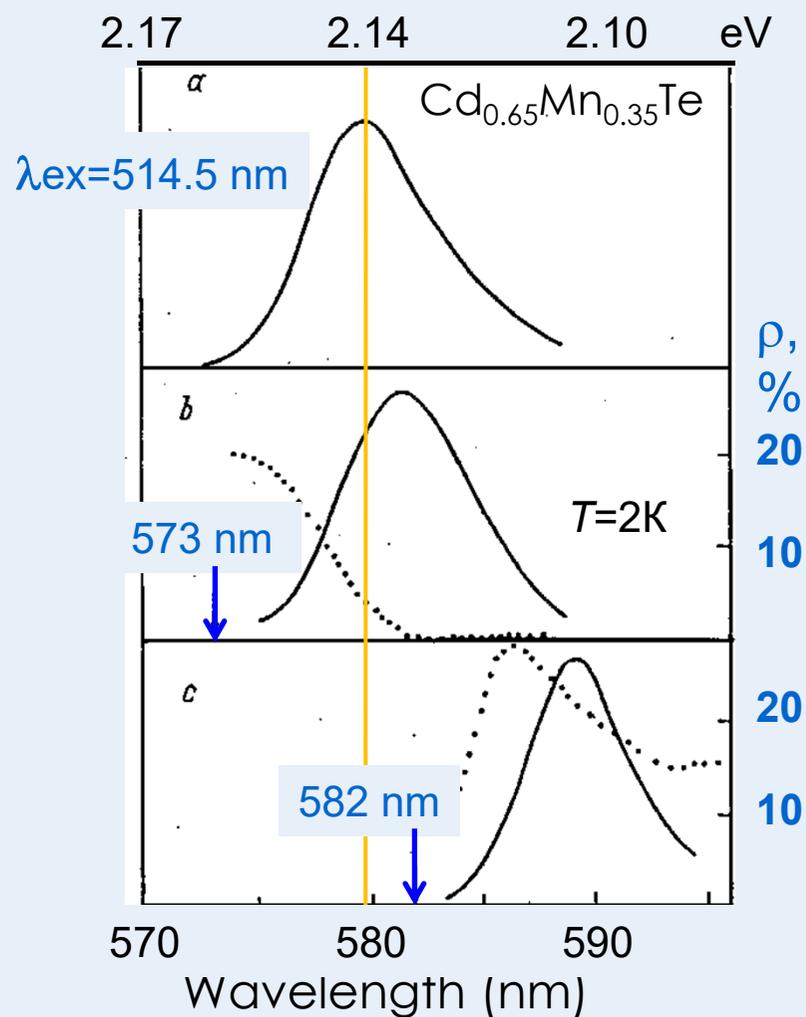
How are the polarons formed?



1. $\sum_i m_j = 0$
2. $\sum_i m_j = M_P$

$$\vec{B}_{ex} = a \sum_i |\Psi(R_j)|^2 \vec{J}_h \propto \frac{a}{V} \vec{J}_h$$

Спектры фотолюминесценции и поляризации



Спектры ФЛ (линии) и циркулярной поляризации (точки) $\text{Cd}_{0.65}\text{Mn}_{0.35}\text{Te}$ при межзонном (a) и селективном (b,c) возбуждении. $E_p \approx 24 \text{ meV}$, $M_p \approx 300 \mu_B$

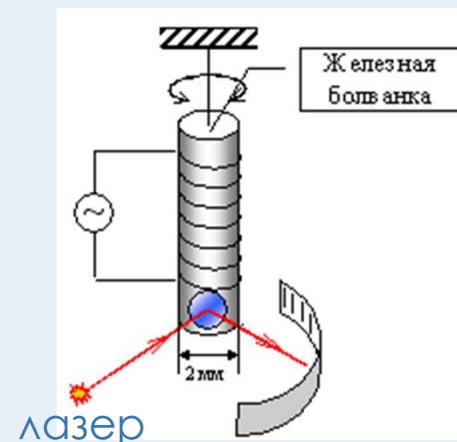
Опыт Эйнштейна-де Гааза

Магнитный момент образца и момент импульса равны:

$$\mathbf{M} = \mathbf{m} * V \text{ и } L = \gamma \mathbf{m} V,$$

где $\mathbf{m} = \chi \mathbf{H}$ - намагниченность, V - объем.

Кристаллическая решетка должна получить такой же по величине момент импульса, но противоположного знака, т.е. $L_{\text{реш}} = - \gamma \mathbf{m} V$



Exchange interactions in 2D systems

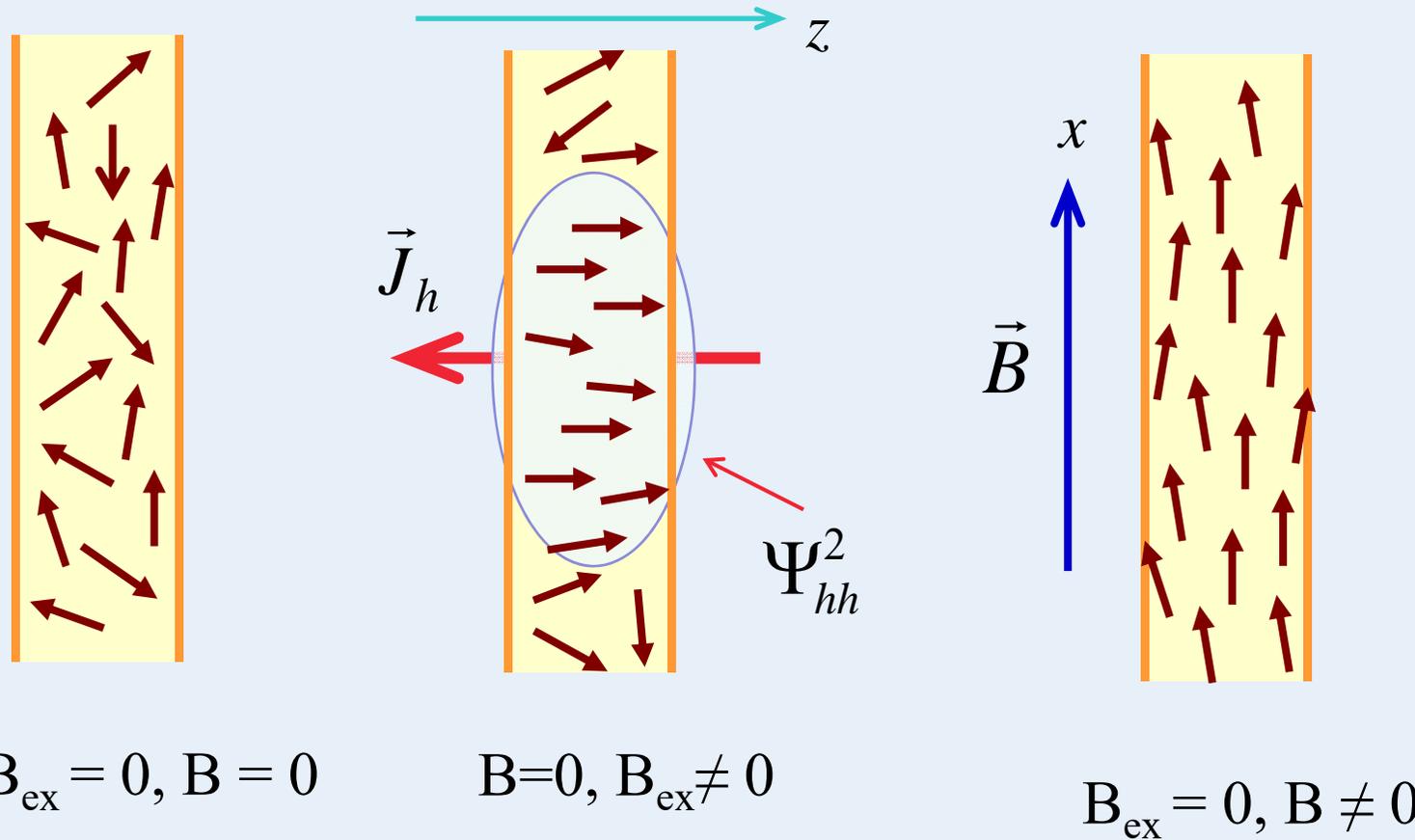
The two-dimensional nature of carrier motion leads to various anisotropic effects. In particular, spin-orbit interaction in the valence band leads to anisotropy of spin properties:

$$J_{hh} = 3/2 (L_h = 1, j_h = 1/2), \quad J_{hh}^z = \pm 3/2$$

$$g_{zz} \gg g_{xx}, g_{yy}$$

Анизотропный магнитный полярон в КЯ

spin-orbit interaction: $J_{hh} = 3/2$, $J_{hh}^z = \pm 3/2$, $g_{xx}, g_{yy} \ll g_{zz}$

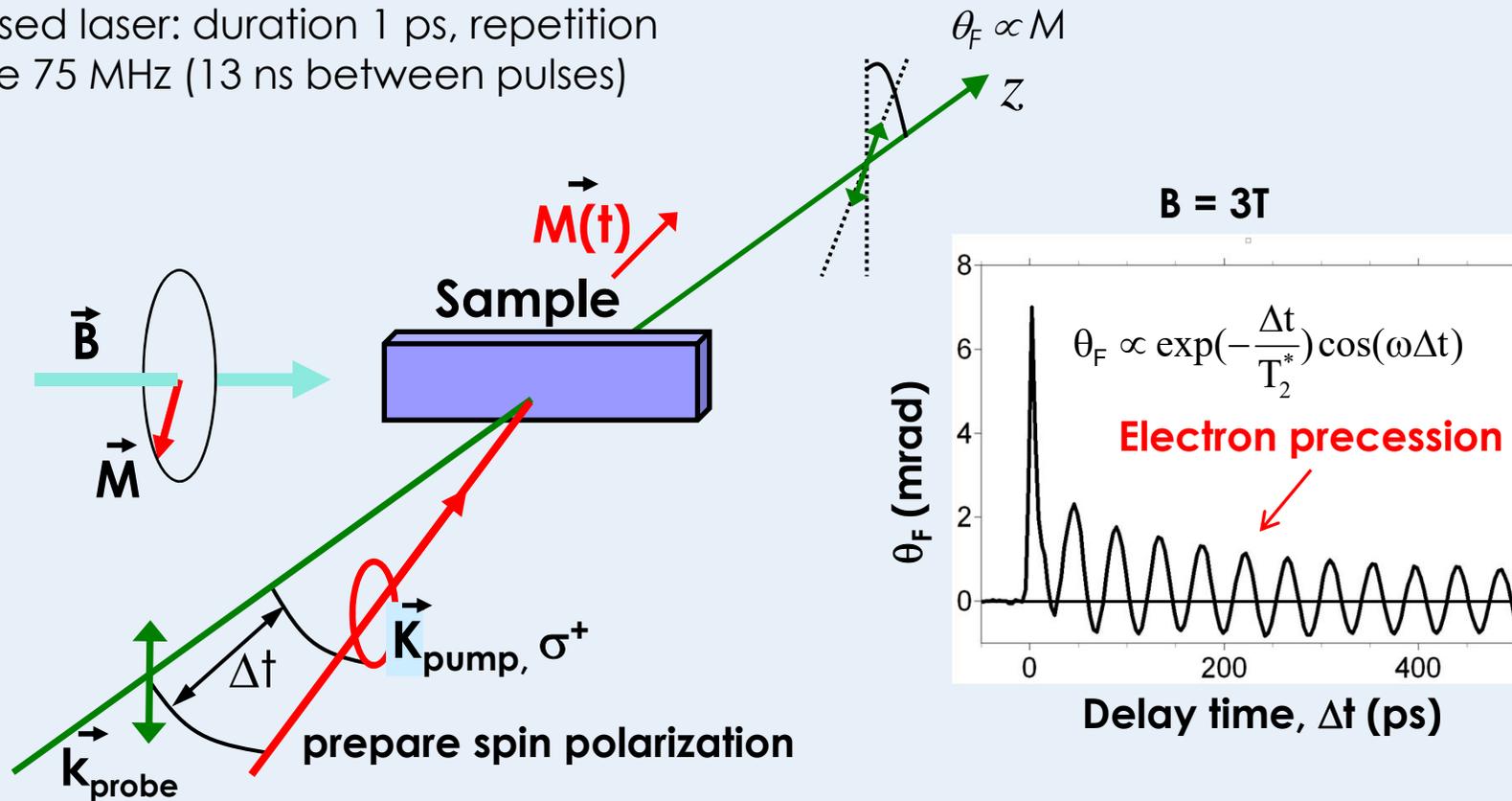


$$\vec{B}_{ex} = a \sum_i |\Psi_{hh}(R_j)|^2 \vec{J}_h \propto \frac{a}{V} \vec{J}_h$$

Detection of spin dynamics

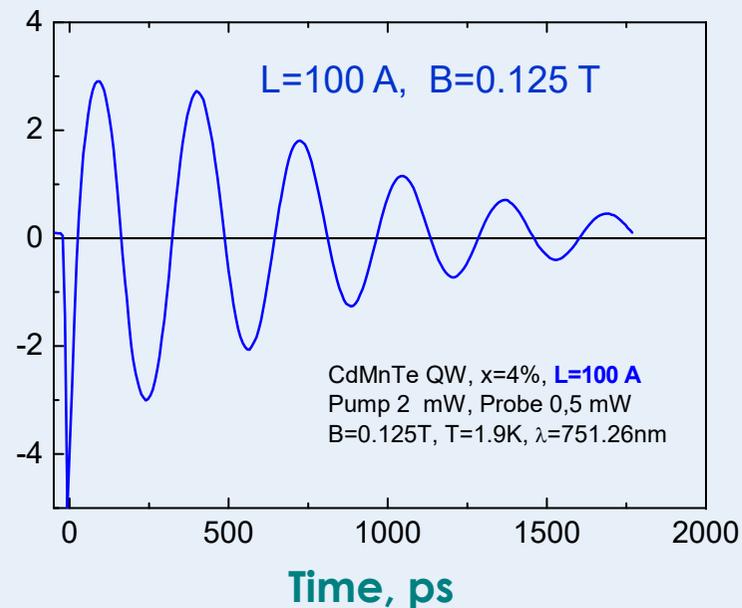
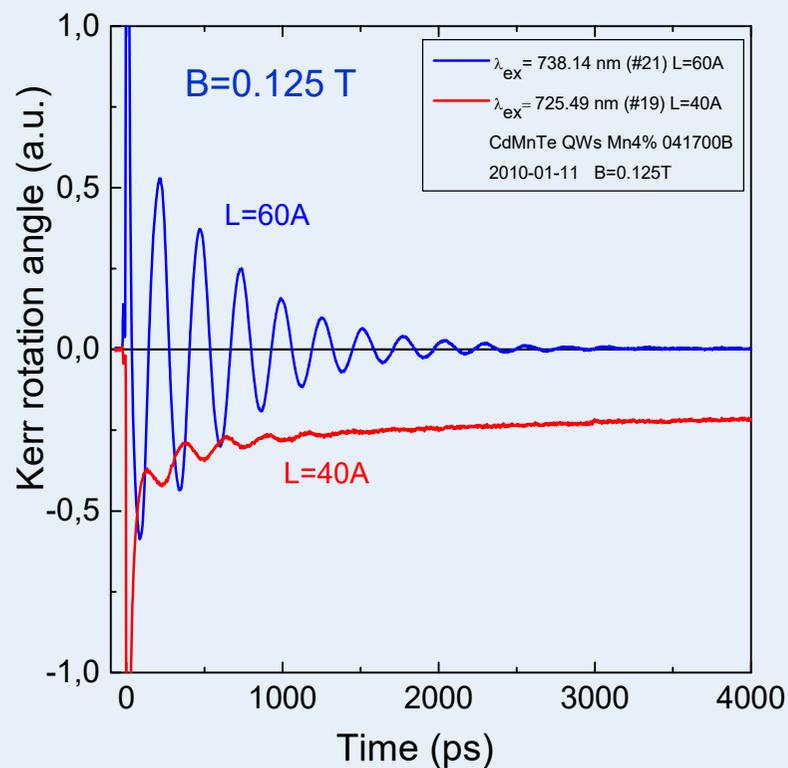
Pump - Probe Faraday rotation

Pulsed laser: duration 1 ps, repetition rate 75 MHz (13 ns between pulses)



Sensitivity – 1 μrad or $\sim 10 \mu_B/\mu\text{m}^3$ (magnetization of ferri- and ferromagnets ~ 100 -1000 G corresponds to 10^{10} - 10^{11} spins/ μm^3).

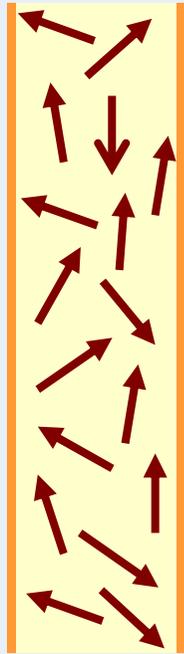
Оптически индуцированная намагниченность: эффект Керра в КЯ CdMnTe/CdMgTe разной ширины



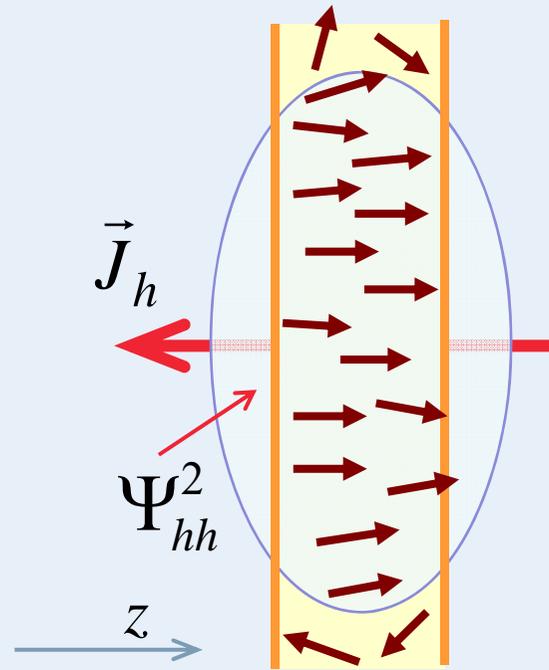
QW CdMnTe/CdMgTe, $x=0.04$

Осцилляции керровского угла соответствуют g-фактору Mn: $g_{\text{Mn}}=2$

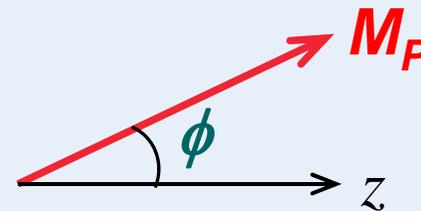
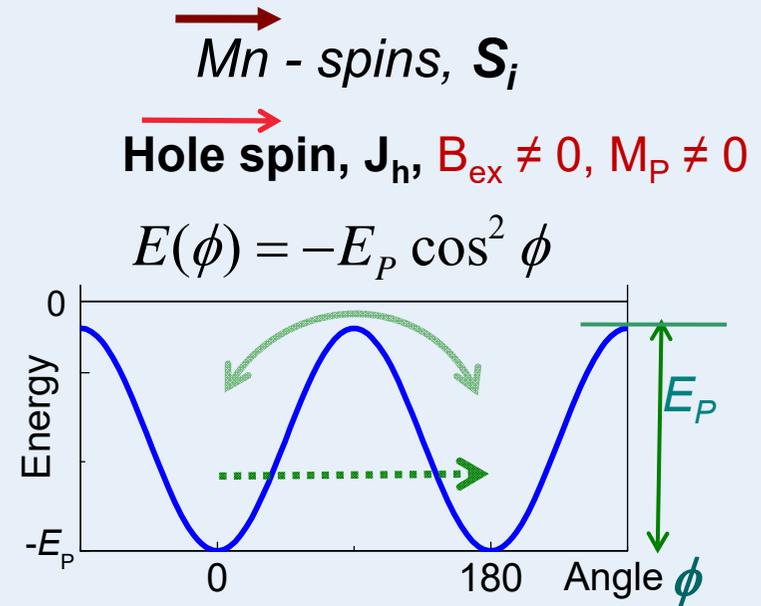
Anisotropic magnetic polaron in 2D



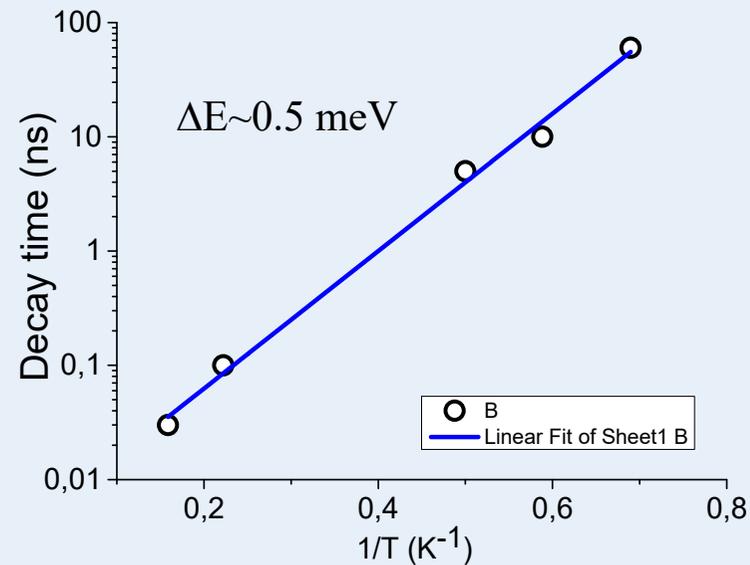
QW, no carrier
 $B_{ex} = 0, M_P = 0$



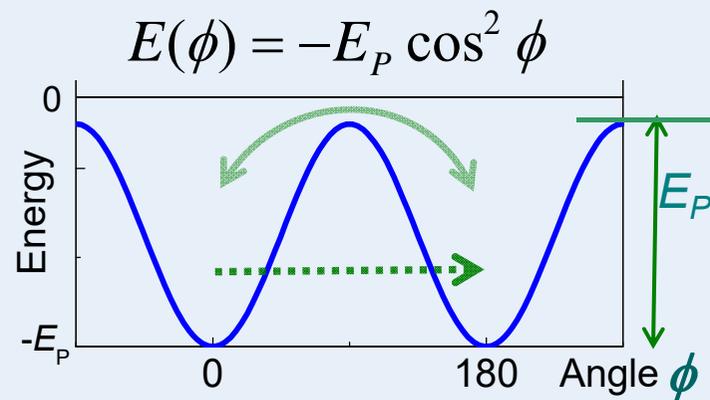
QW, localized hole
 Polaron: $B_{ex} \neq 0, M_P \neq 0$



Зависимость времени релаксации намагниченности поляронов от температуры

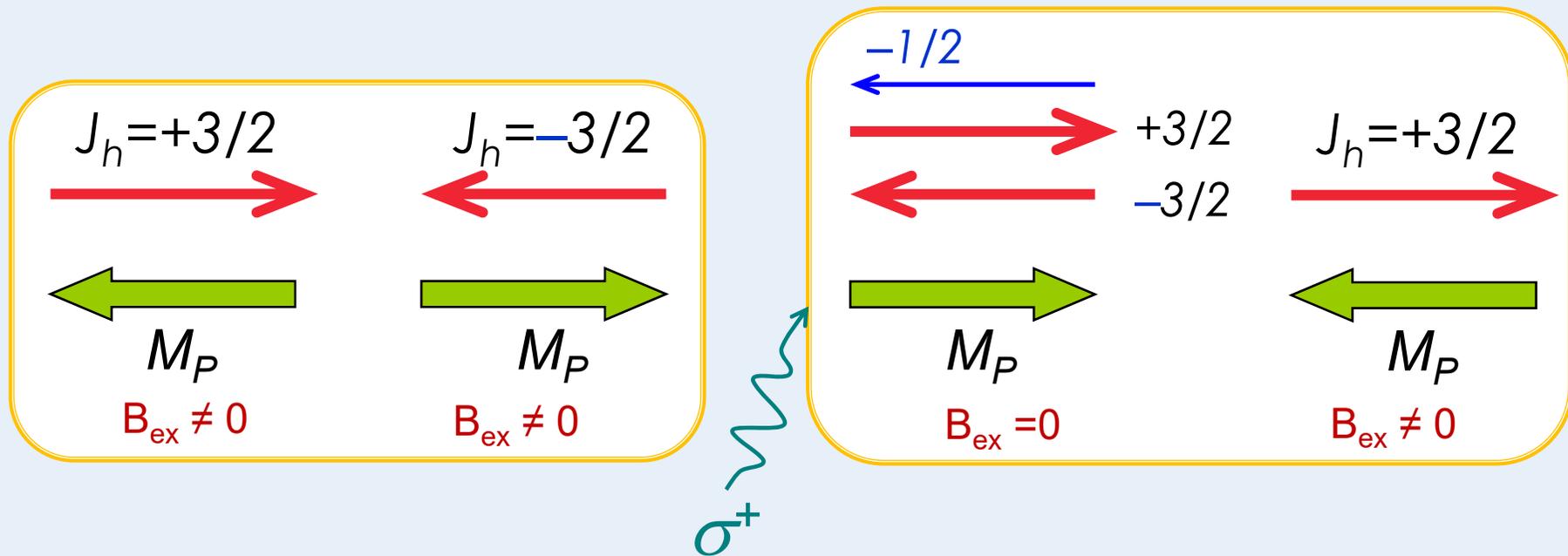


$$\frac{\tau(T)}{\tau_0} = \exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right)$$
$$\Delta E = E_p$$

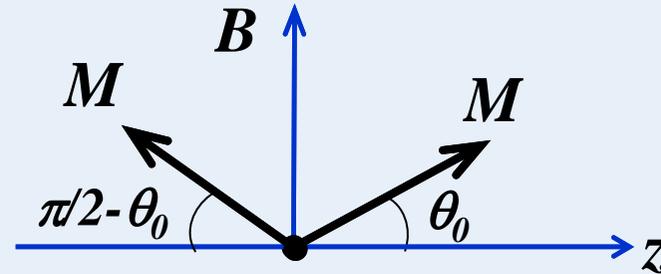
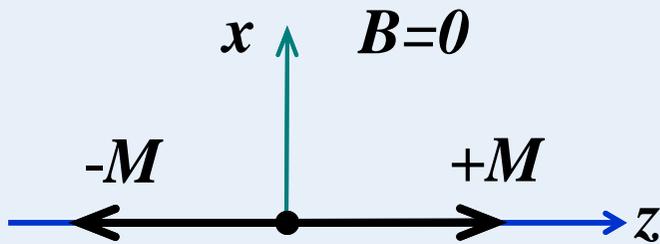


Активационный процесс или квантовое туннелирование?

Mechanism of optical orientation of hole magnetic polarons: $B=0$

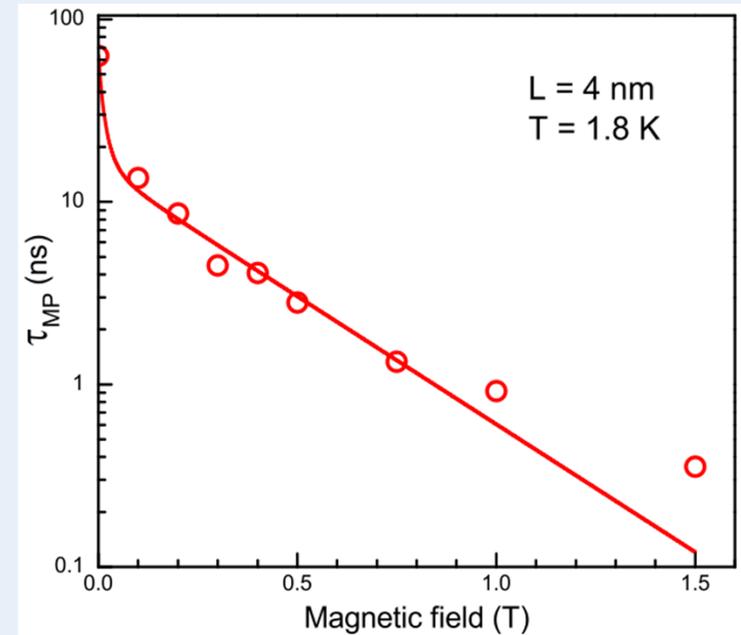
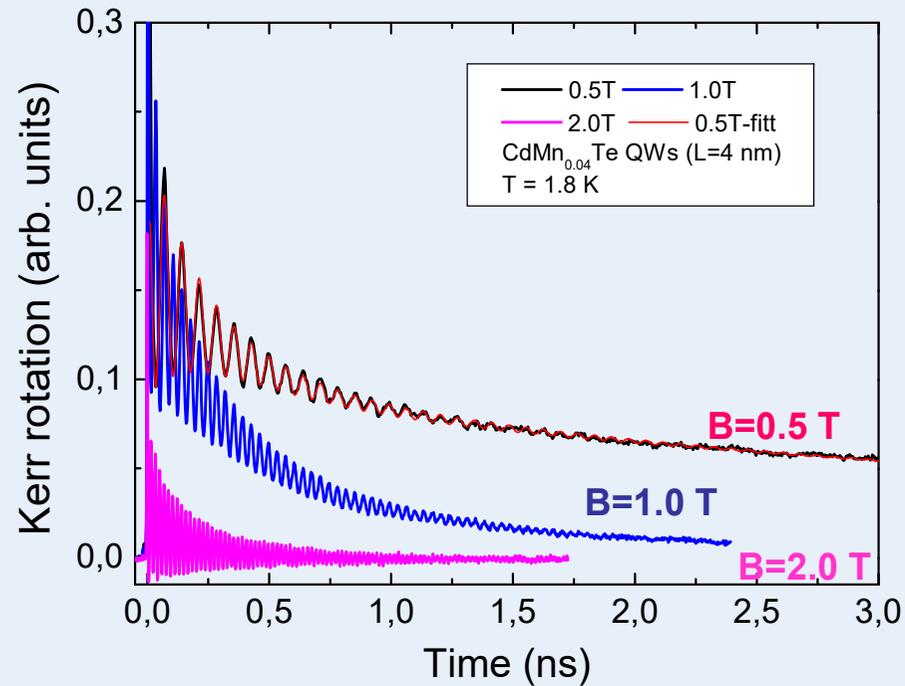


Устойчивые состояния МП в магнитном поле



$$\frac{\tau(B)}{\tau(0)} = \exp\left(\frac{\Delta E(B)}{k_B T}\right)$$

Magnetic field dependence



$$\tau_{\text{MP}}(B, T) \approx \tau_0 \exp\left(\frac{E_a(B, T)}{k_B T}\right).$$

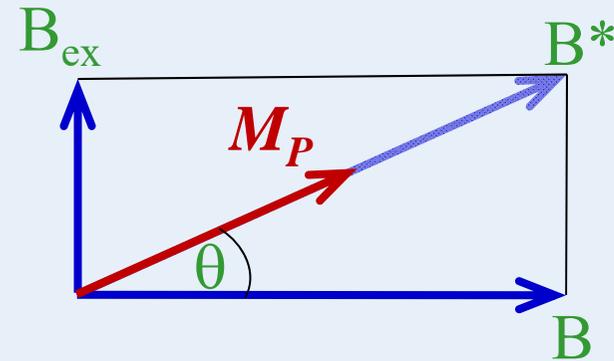
$$E_a = \frac{1}{2} \frac{d\Delta E_z^{\text{hh}}}{dB} B_{\text{ex}} \sqrt{1 + \frac{B^2}{B_{\text{ex}}^2}} \left(\sqrt{1 + \frac{B^2}{B_{\text{ex}}^2}} - \frac{B}{B_{\text{ex}}} - \frac{g_{\perp}}{g_{zz}} \right)$$

$$\tau_0 \sim 100 \text{ ns} \quad (\Delta E \sim 0.5 \text{ meV}, B_{\text{ex}} \sim 1 \text{ T}, k_B T \sim 0.15 \text{ meV})$$

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

$$E_p(B, \theta) = -\mu_B g_{Mn} I (B_{ex} \sin \theta + B \cos \theta)$$

The activation energy



$$\Delta E = E_p(0) \cdot \left(1 + \frac{B^2}{B_{ex}^2} + \frac{g_{\perp}}{g_{zz}} \right) - \frac{1}{2} E_z(B) \sqrt{1 + B^2 / B_{ex}^2}$$

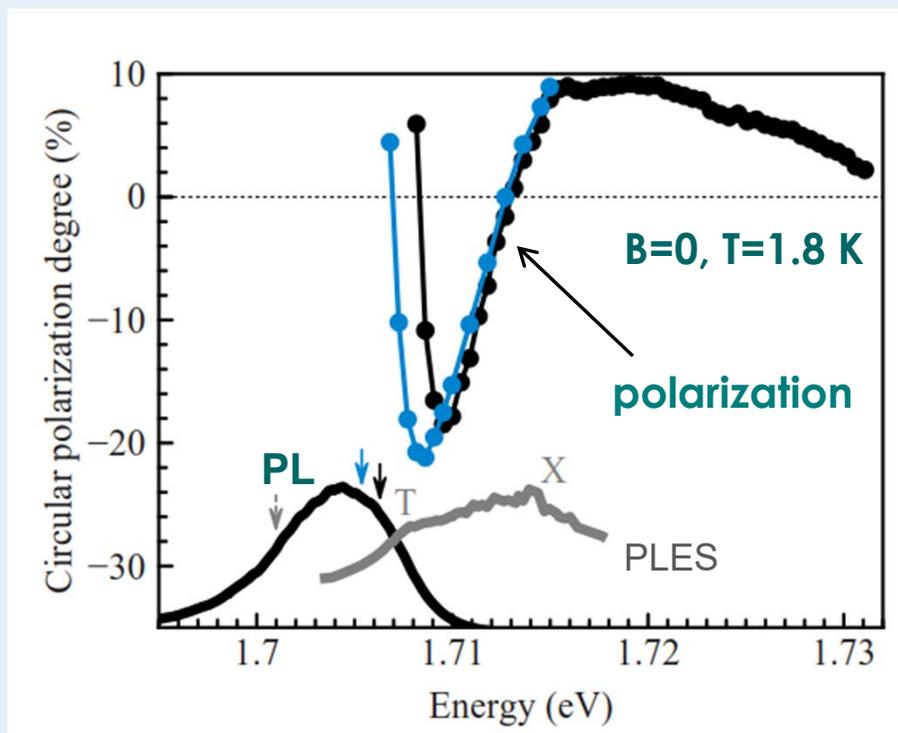
Therefore, the field dependence of the polaron relaxation time has the form

$$\frac{\tau(B)}{\tau(0)} \approx \exp\left(\frac{\Delta E(B)}{k_B T}\right)$$

$$\tau \sim 10 \text{ ns} \quad (\Delta E \sim 0.5 \text{ meV}, B_{ex} \sim 1 \text{ T}, k_B T \sim 0.15 \text{ meV})$$

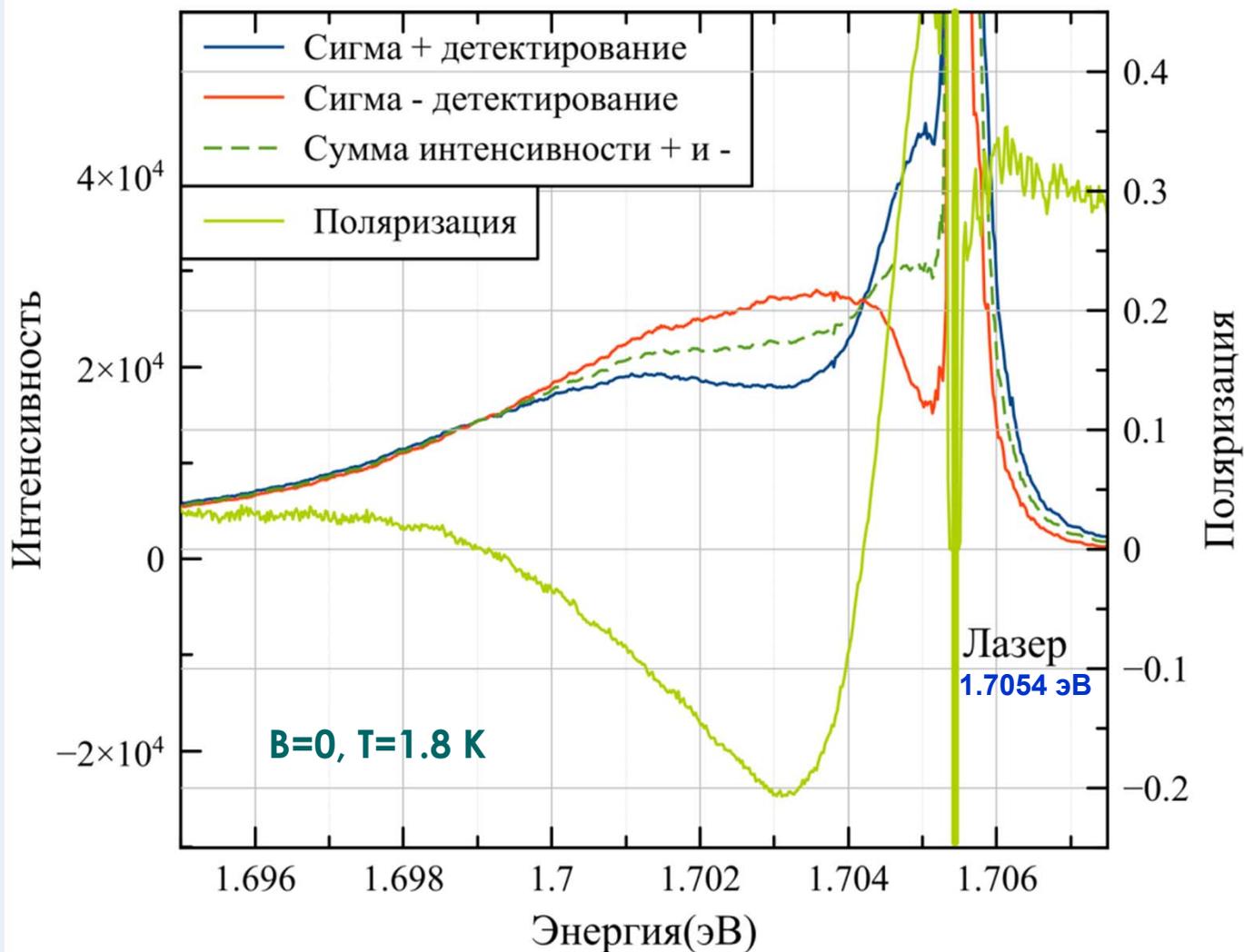
Отрицательная циркулярная поляризация ФЛ в квантовых ямах CdMnTe/CdMgTe

Наблюдение циркулярной поляризации излучения, противоположной по отношению к знаку поляризации возбуждающего света указывает на наличие необычного механизма формирования поляризации.



Спектр ФЛ (черная линия) и спектры возбуждения циркулярной поляризации излучения (точки)

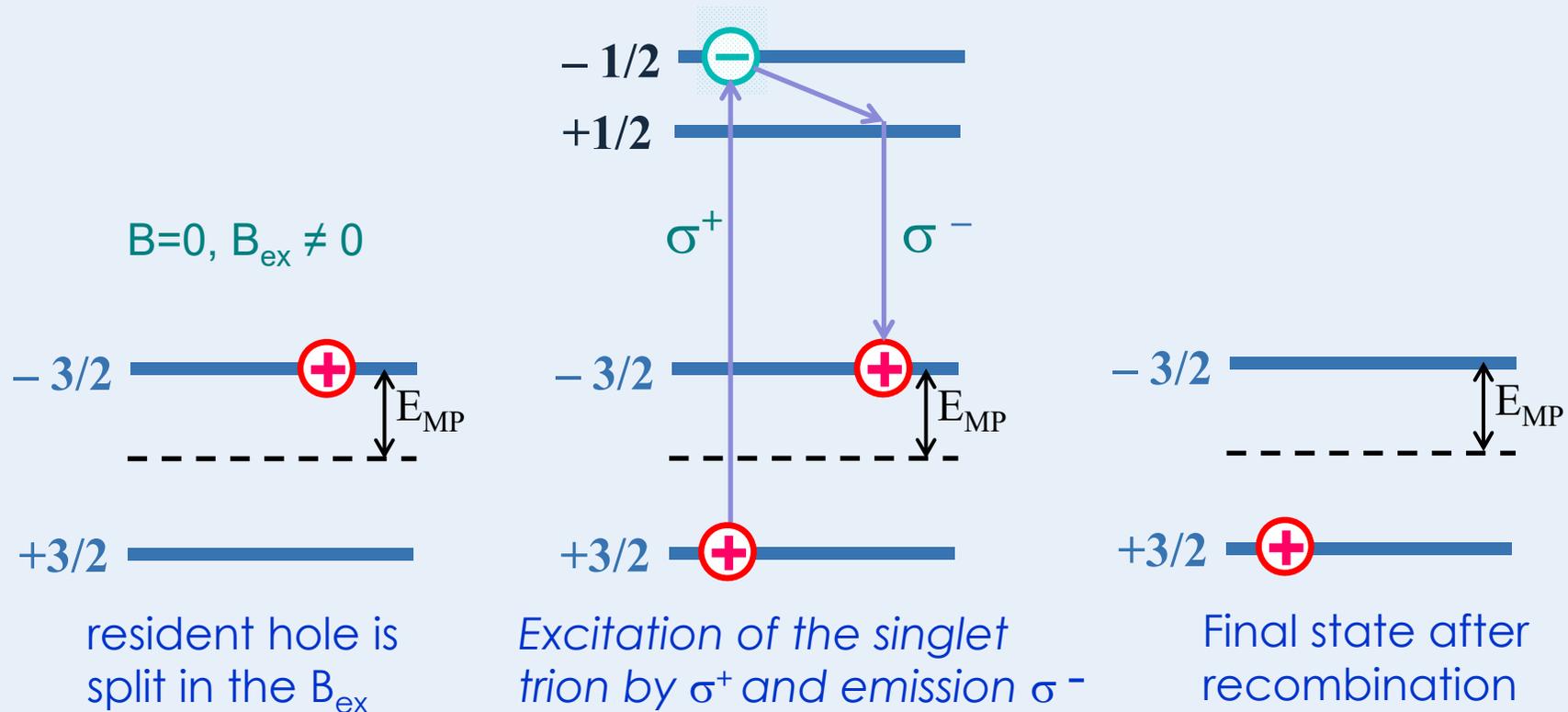
Люминесценция и поляризация в нулевом магнитном поле



Спектр разрешенной по поляризации ФЛ в КЯ Cd_{1-x}Mn_xTe/CdMgTe, x=0.01

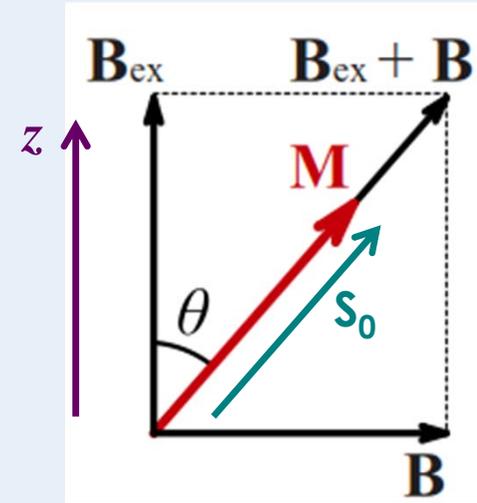
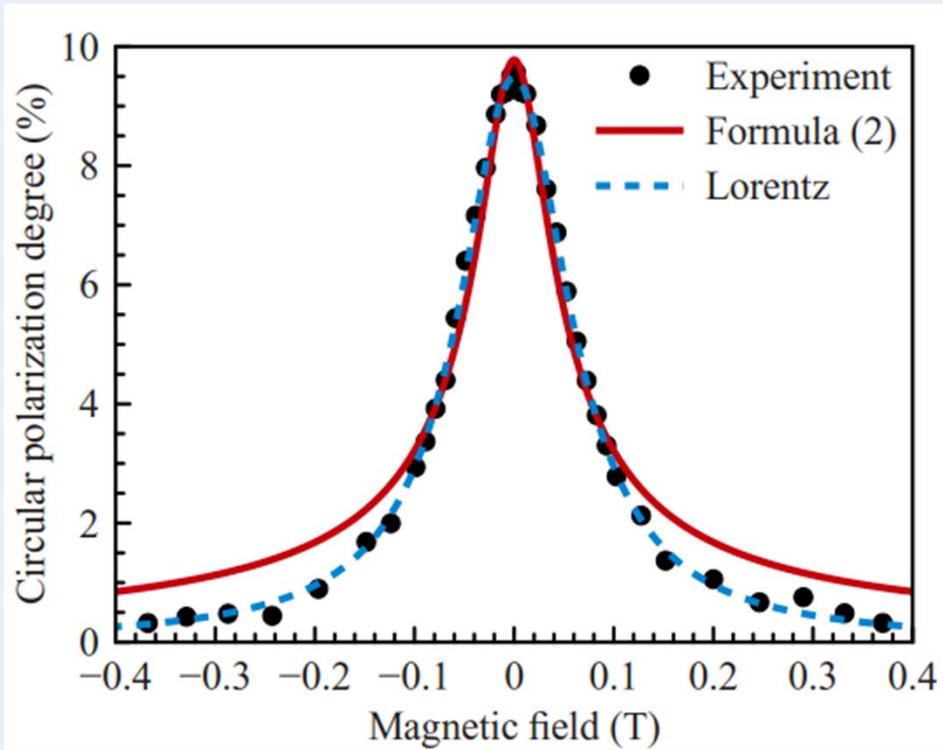
Модель возникновения отрицательной циркулярной поляризации ФЛ

Resident holes in QW form magnetic polarons (HMP). Resonant σ^+ excitation creates directly X^+ trion with $S_T = -1/2$



This process is spin selective: Optical excitation by σ^+ light excites trion state $(-1/2)$. After that electron undergoes relaxation and spin flip into the $s_z = -+1/2$ state and recombines with the resident hole emitting σ^- .

PL circular polarization degree on the transverse magnetic field



Polaron magnetic moment in external magnetic field B .

$$\rho_{CPD} \sim \langle S_z \rangle = S_0 \cos \theta \sim \frac{\rho_0}{\sqrt{1 + B^2 / B_{ex}^2}} \quad (2)$$

Разбавленные магнитные полупроводники на основе $A^{II}B^{VI}$

- ❖ Высокая растворимость магнитных атомов (в частности Mn) в полупроводниках $A^{II}B^{VI}$ (до 100%)
- ❖ Сохраняются «хорошие» полупроводниковые и оптические свойства вплоть до высоких концентраций Mn
- ❖ Mn в полупроводниках $A^{II}B^{VI}$ является изоэлектронной примесью и не дает дополнительных носителей заряда
- ❖ Отсюда возможность независимо контролировать концентрацию магнитных примесей и носителей
- ❖ Низкая температура Кюри (~ 1 K)
- ❖ Короткое время спиновой релаксации носителей (~ 1 пс)