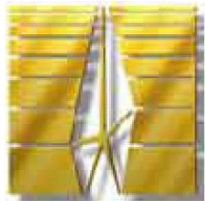


Спиновые явления в полупроводниках и топологических изоляторах

Л.Е. Голуб



**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург**

Спиновые явления в полупроводниках и топологических изоляторах

- 1. Оптическая ориентация спинов. Эффект Ханле**
- 2. Механизмы спиновой релаксации**
- 3. Спиновая ориентация электрическим током**
- 4. Топологические изоляторы**

Межзонное поглощение света

c — s

$$\leftarrow \text{wavy line} \quad \hat{H}_{e-photon} = -\frac{e}{c} A_0 \mathbf{e} \cdot \hat{\mathbf{p}}$$

v — p

$$\langle S | \hat{p}_x | X \rangle = \langle S | \hat{p}_y | Y \rangle = \langle S | \hat{p}_z | Z \rangle \equiv p_{cv}$$

Свет круговой поляризации

$$\mathbf{e}_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, \pm i, 0) \quad \sigma_{\pm}$$

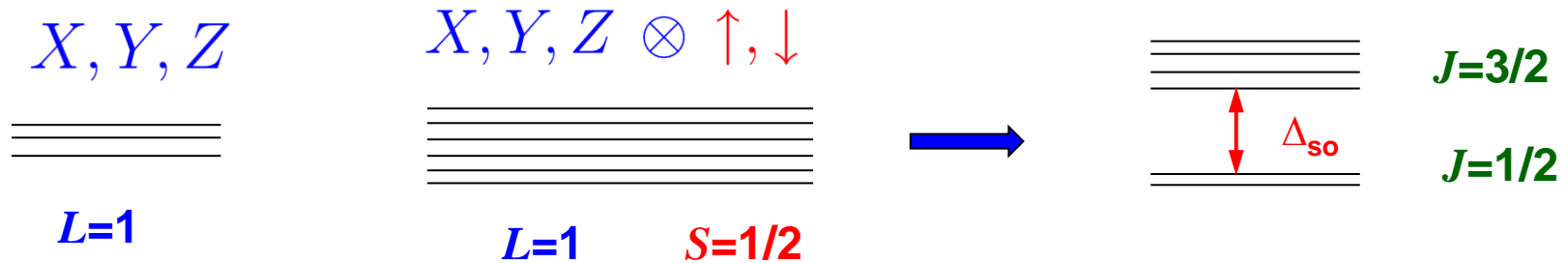
$$\begin{array}{c} X, Y, Z \\ \hline \hline L=1 \end{array}$$

σ_{\pm}

$$\frac{X \mp iY}{\sqrt{2}} \rightarrow S$$

$$L_z = \mp 1$$

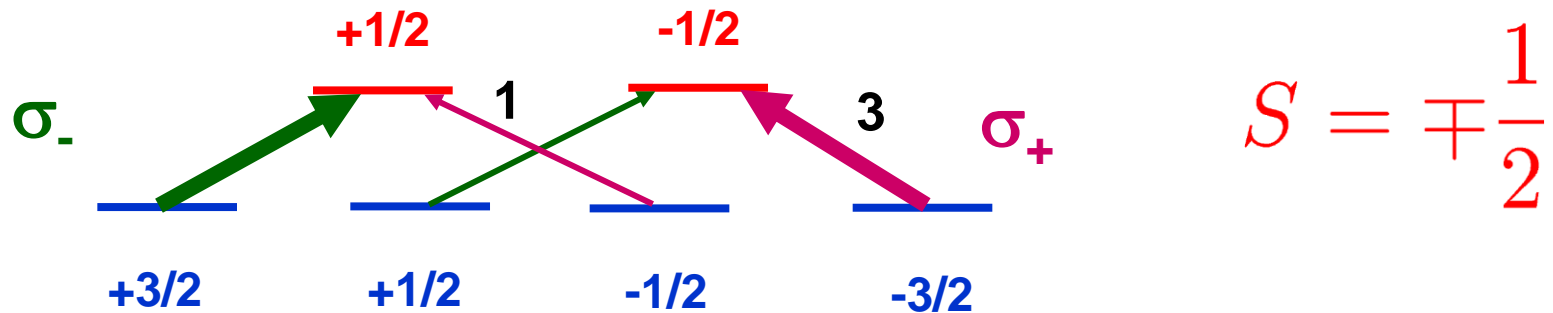
Спин-орбитальное взаимодействие



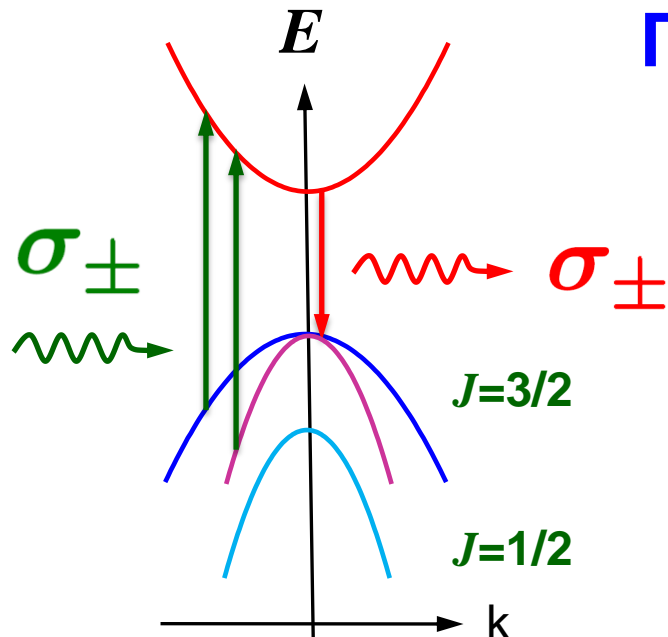
Блоховские функции $J=3/2$

$-\frac{X + iY}{\sqrt{2}} \uparrow$	$-\frac{X + iY}{\sqrt{6}} \downarrow + \sqrt{\frac{2}{3}} Z \uparrow$	$\frac{X - iY}{\sqrt{6}} \uparrow + \sqrt{\frac{2}{3}} Z \downarrow$	$\frac{X - iY}{\sqrt{2}} \downarrow$
$J_z = +3/2$	$J_z = +1/2$	$J_z = -1/2$	$J_z = -3/2$
$\sigma_- \frac{ p_{cv} ^2}{2}$	$\sigma_- \frac{ p_{cv} ^2}{6}$	$\sigma_+ \frac{ p_{cv} ^2}{6}$	$\sigma_+ \frac{ p_{cv} ^2}{2}$

Оптическая ориентация спинов



Поляризованная ФЛ



Степень круговой поляризации

$$P_{circ} = \frac{I_{\sigma_+} - I_{\sigma_-}}{I_{\sigma_+} + I_{\sigma_-}} = \frac{1}{4}$$

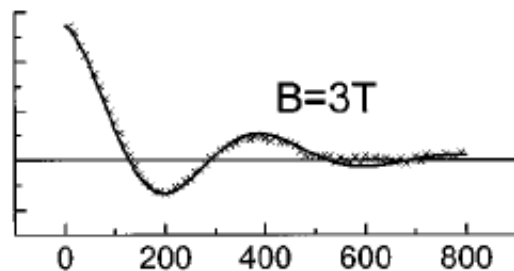
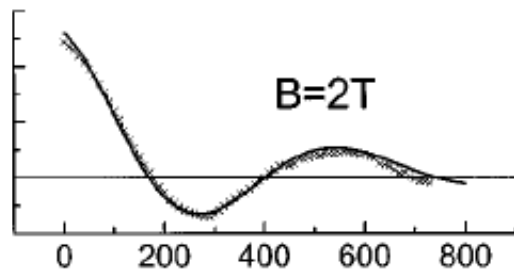
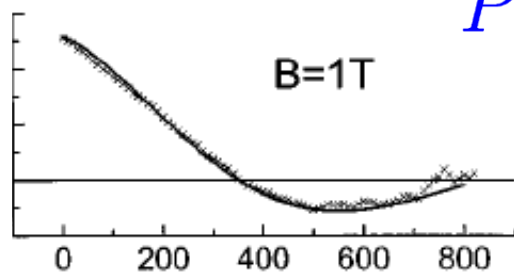
Спиновая динамика

Кинетика поляризации ФЛ

$$P(t) = P(0)e^{-t/\tau_s}$$

Время спиновой релаксации τ_s

Circular polarization



Time (ps)

В поперечном магнитном поле

$$\Omega_L = g^* \mu_B B_{\perp} / \hbar$$

$$S(t) = S(0) \cos(\Omega_L t) e^{-t/\tau_s}$$

Эффект Ханле

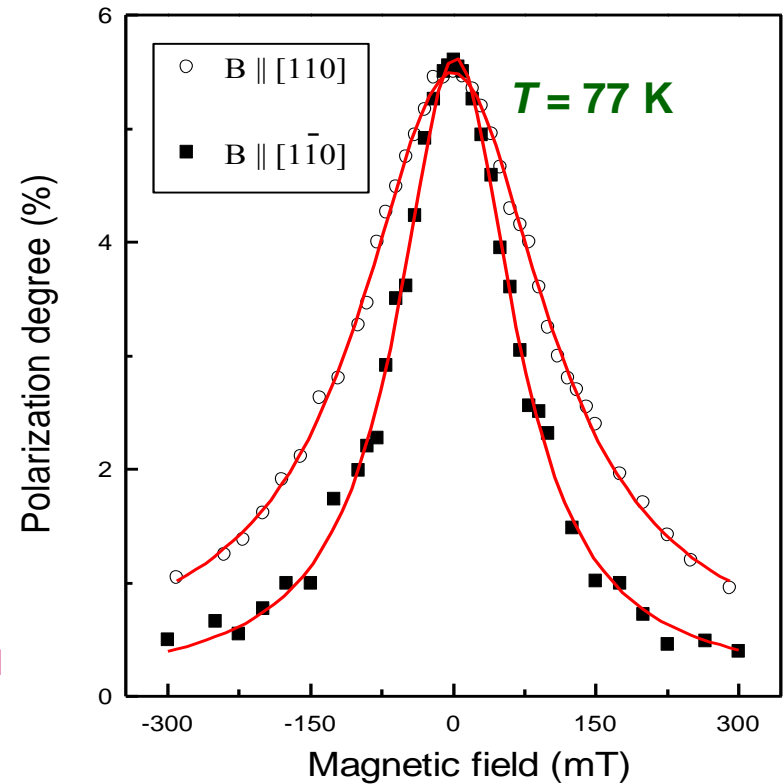
Steady-state PL

$$S = \frac{S_0}{1 + \tau_0/\tau_s}$$

В поперечном магнитном поле

$$S_z(B_{\perp}) = \frac{S_0}{1 + \Omega_L^2 (1/\tau_0 + 1/\tau_s)^{-2}}$$

деполяризация ФЛ магнитным полем



Спиновые явления в полупроводниках и топологических изоляторах

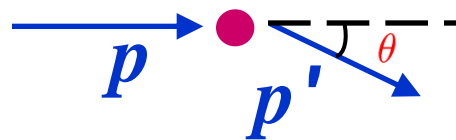
1. Оптическая ориентация спинов. Эффект Ханле
2. **Механизмы спиновой релаксации**
3. Спиновая ориентация электрическим током
4. Топологические изоляторы

Спиновая релаксация

Поведение спина в отсутствие магнитного поля

Импульс: есть рассеяние

(примеси, дефекты, фононы, гетероинтерфейсы...)



Следствие: **релаксация** импульса

$$p_x(t) = p_x(0) e^{-t/\tau_p} \quad \frac{1}{\tau_p} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{p'} |V_{pp'}|^2 \delta(E_p - E_{p'}) (1 - \cos \theta)$$

Спин – аналогично:

$$S_i(t) = S_i(0) e^{-t/\tau_s}$$

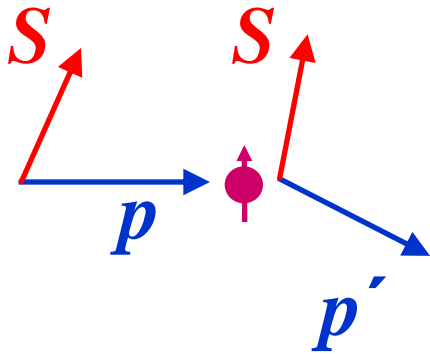
τ_s – время спиновой релаксации

Рассеяние на магнитных примесях

3D и 2D GaMnAs структуры

Обменное взаимодействие **свободного** электрона с электронами, **локализованными** на атомах Mn

$$V_M(\mathbf{r}) = -\alpha \sum_i \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}_i \delta(\mathbf{r} - \mathbf{R}_i)$$



$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{\mathbf{k}'} |\langle \uparrow \mathbf{k} | V_M | \downarrow \mathbf{k}' \rangle|^2 \delta(E_{\mathbf{k}} - E_{\mathbf{k}'})$$

$$\frac{1}{\tau_s} \sim \alpha^2, \mathcal{N}_M$$

Спин-орбитальное взаимодействие

На электрон, движущийся в электрическом поле E , действует магнитное поле B

$$B = E \times \frac{v}{c}$$

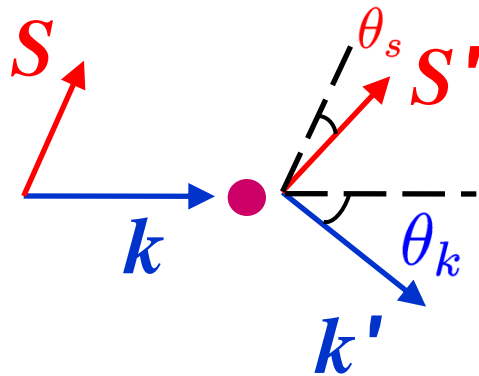
- релятивистский эффект

$$\mathcal{H}_{SO} = \gamma \mathbf{S} \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{k})$$

- вращение спина вокруг импульса

Спиновая релаксация при рассеянии

При столкновениях меняется не только k , но и S



Угол поворота

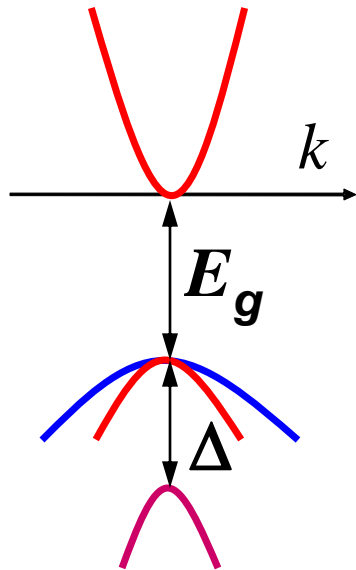
$$\theta_s \approx \gamma \theta_k \ll \theta_k$$

механизм Эллиота-Яфета

R.J. Elliott (1954)

Y. Yafet (1963)

Время спиновой релаксации по механизму Эллиота-Яфета



$$\Psi_{1\mathbf{k}} = \uparrow + i c k \downarrow$$

$$\Psi_{2\mathbf{k}} = \downarrow - i c k \uparrow$$

$$c = \frac{P}{3E_g} \frac{\Delta}{E_g}$$

$$\frac{1}{\tau_s} = 2 \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} |\langle 1\mathbf{k} | V | 2\mathbf{k}' \rangle|^2 \delta(E_{\mathbf{k}} - E_{\mathbf{k}'}) f(E_{\mathbf{k}})$$

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{1}{\tau_p} \left(\frac{k_B T}{E_g} \right)^2 \left(\frac{\Delta}{E_g} \right)^2 R \quad R \sim 1$$

Спиновая релаксация без рассеяния

релаксация в поле кристаллической решётки

М.И. Дьяконов, В.И. Перель (1971)

механизм ДП

— основной механизм потери спина
в нелегированных GaAs гетероструктурах

Спиновое вырождение

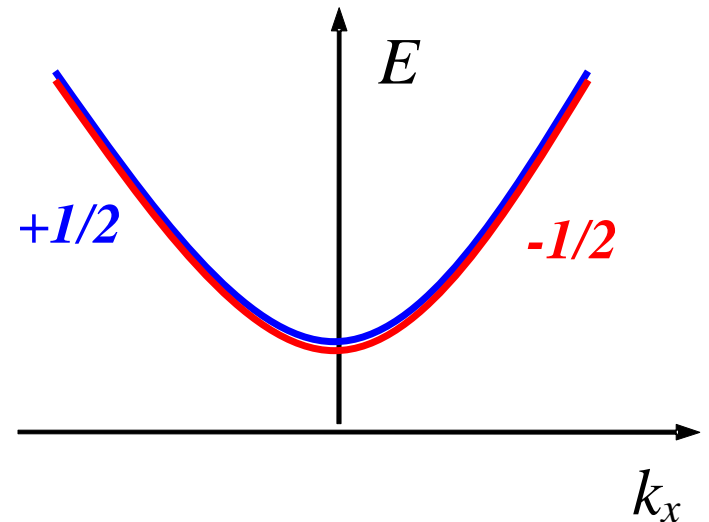
ЭЯ-механизм: переходы в вырожденном спектре

Инверсия времени: $E_{\uparrow}(\mathbf{k}) = E_{\downarrow}(-\mathbf{k})$

Пространственная инверсия: $E_{\uparrow}(\mathbf{k}) = E_{\uparrow}(-\mathbf{k})$

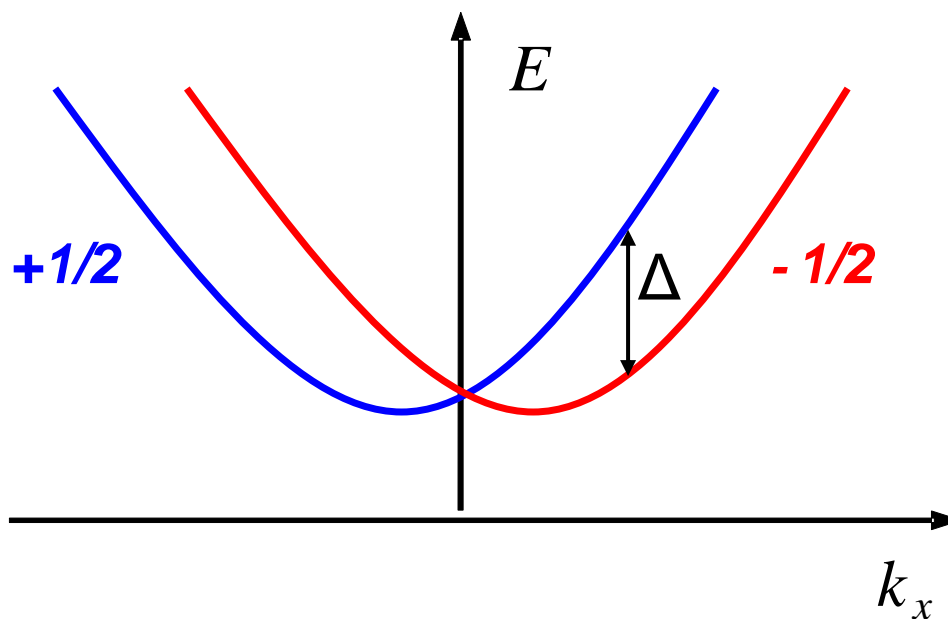
**В системах
с центром инверсии**

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



Спиновые расщепления в гетероструктурах

В отсутствие центра инверсии

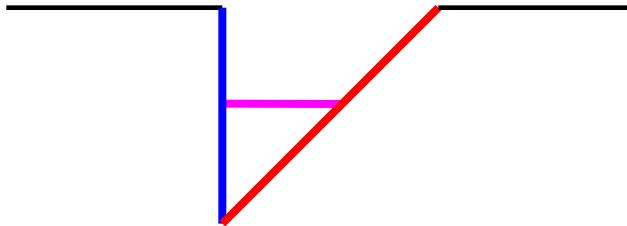


$$\hat{\mathcal{H}} \propto \hat{\sigma}_i k_j, \hat{\sigma}_i k_j^3$$

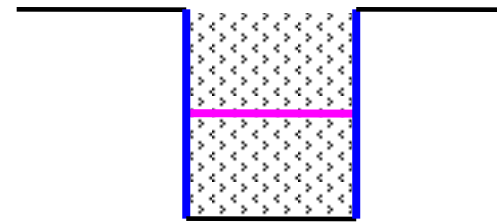
$$\hat{\mathcal{H}} = \alpha(\hat{\boldsymbol{\sigma}} \times \mathbf{k}) \cdot \mathbf{n}$$

2D полупроводники

Несимметричная
квантовая яма:
SIA



Квантовая яма
из полупроводника
без центра инверсии:
BIA



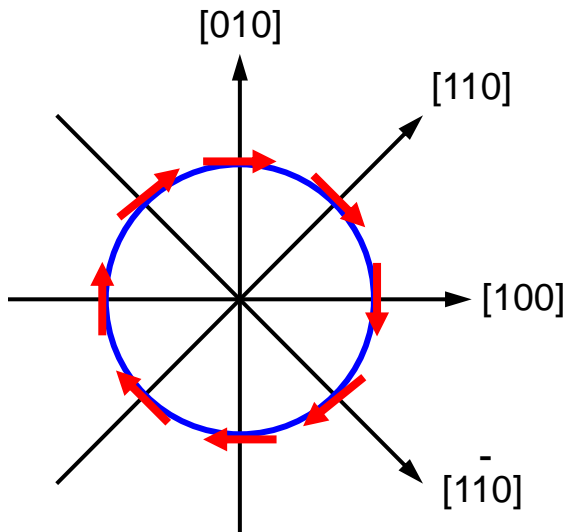
$$\hat{\mathcal{H}}_{\text{SIA}} = \alpha(\hat{\sigma}_x k_y - \hat{\sigma}_y k_x) \quad \hat{\mathcal{H}}_{\text{BIA}} = \beta(\hat{\sigma}_x k_x - \hat{\sigma}_y k_y)$$

$$\Delta = 2\alpha k$$

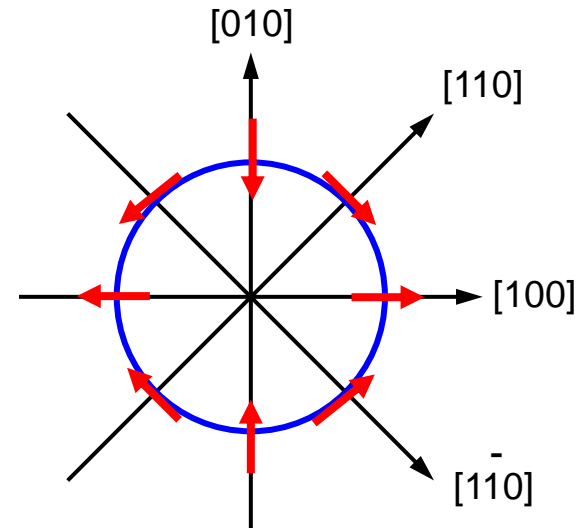
$$\Delta = 2\beta k$$

Эффективное магнитное поле

$$\hat{\mathcal{H}} = \hbar \hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \boldsymbol{\Omega}(\mathbf{k}) \quad \Delta = 2\hbar |\boldsymbol{\Omega}(\mathbf{k})|$$



SIA



BIA

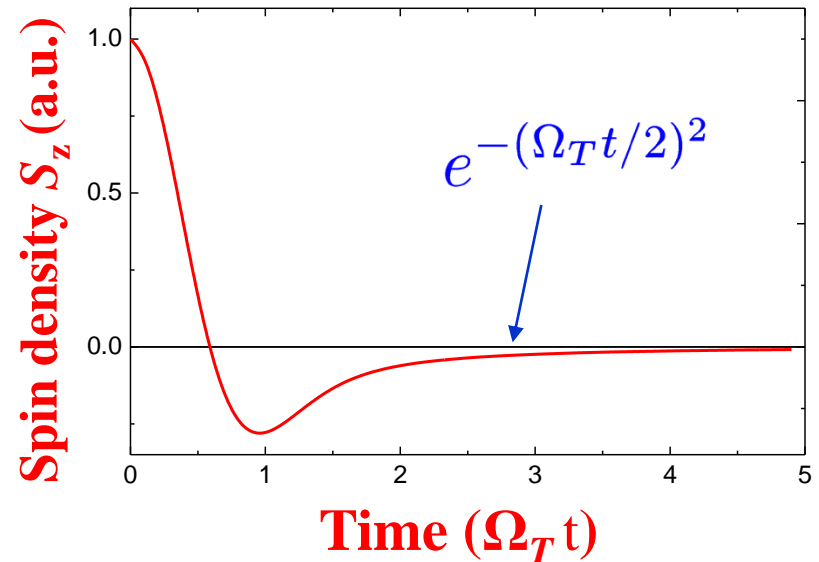
Спиновая динамика

2D электроны на поверхности Ферми: $\Omega = \Omega(k_F)$

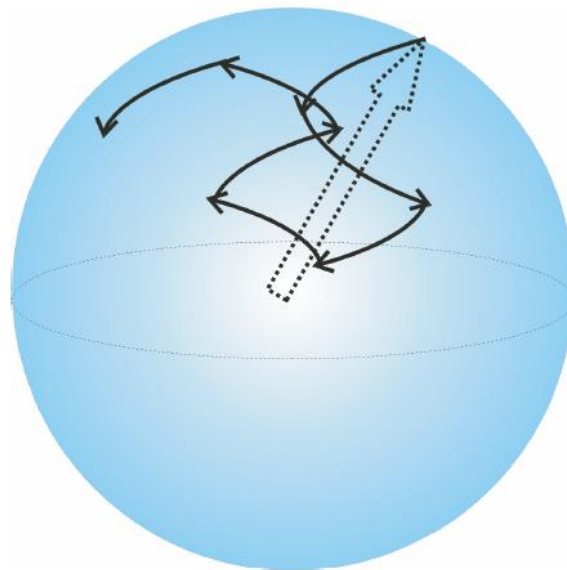
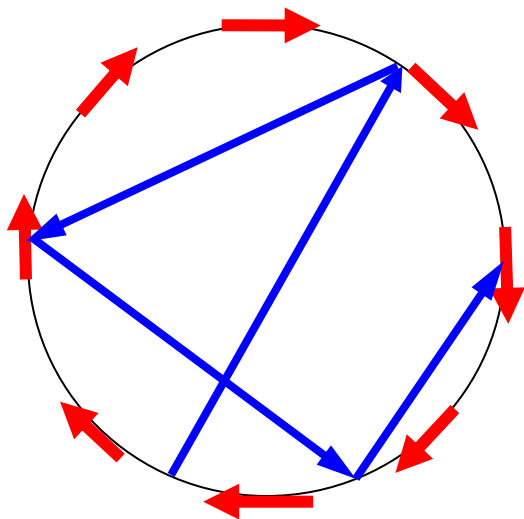
$$S_z(t) = S_z(0) \cos \Omega t$$

2D больцмановские электроны:

$$\Omega_T = \alpha k_T = \alpha \sqrt{2mk_B T / \hbar}$$



Спиновая динамика с учётом рассеяния



$$S(t) = S(0)e^{-t/\tau_s} \quad \frac{1}{\tau_s} \sim \overline{\Omega^2} \tau_p$$

М.И. Дьяконов, В.И. Перель (1971)

Спиновые явления в полупроводниках и топологических изоляторах

1. Оптическая ориентация спинов. Эффект Ханле
2. Механизмы спиновой релаксации
3. Спиновая ориентация электрическим током
4. Топологические изоляторы

Спиновая ориентация электрическим током



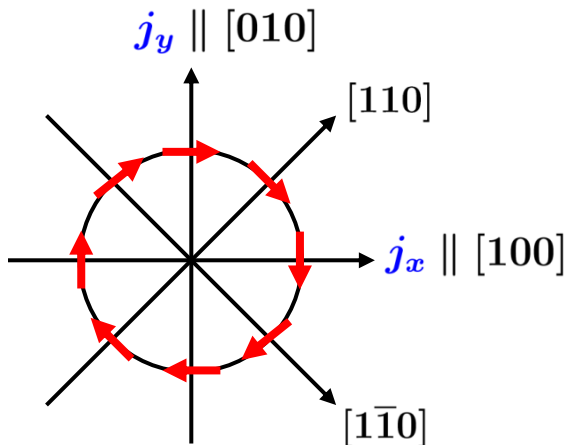
Спиновая ориентация током в квантовых ямах

$$\mathbf{S}_i = Q_{im} \mathbf{j}_m$$

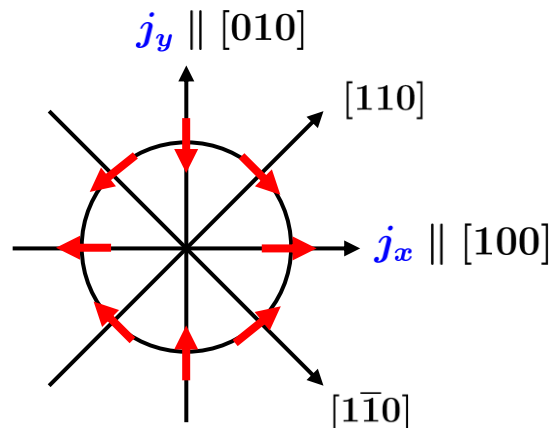
аксиальный
вектор

полярный
вектор

SIA

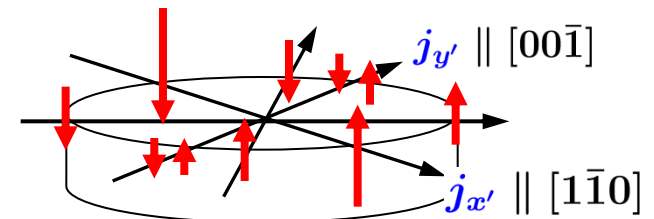


(001) QWs



BIA

(110) QWs



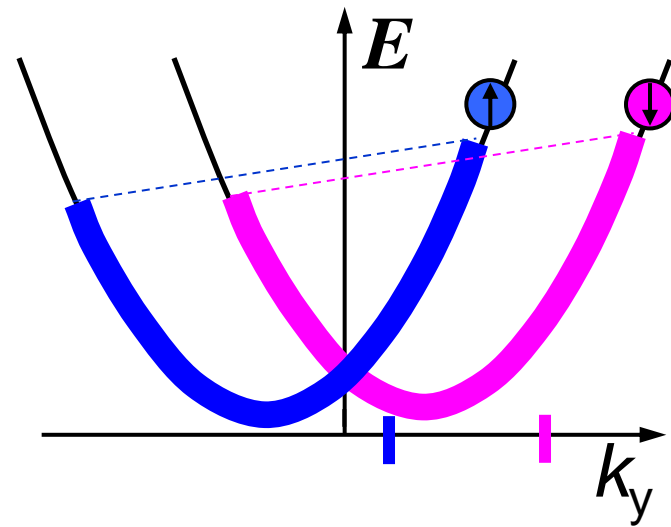
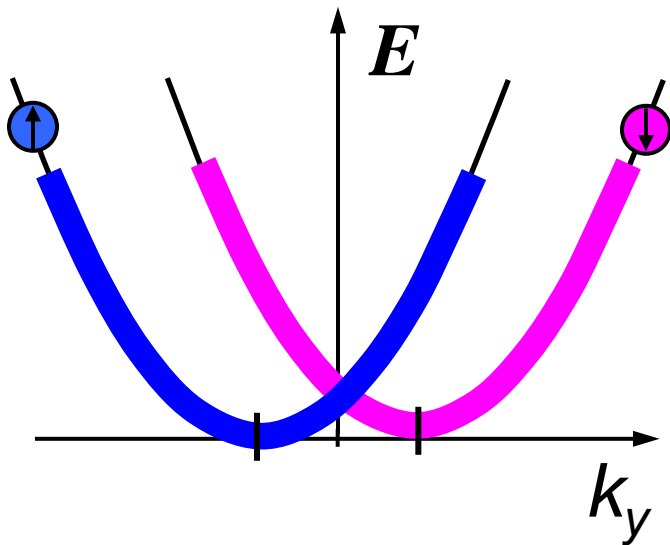
Эффект электрического поля

$$\mathcal{H}_{SO} = \beta \sigma_x k_y$$

$$\Delta_{so}(\mathbf{k}) = 2\beta k_y$$

$$s \sim \frac{\Delta_{so}(\mathbf{k}_{dr})}{\langle E \rangle}$$

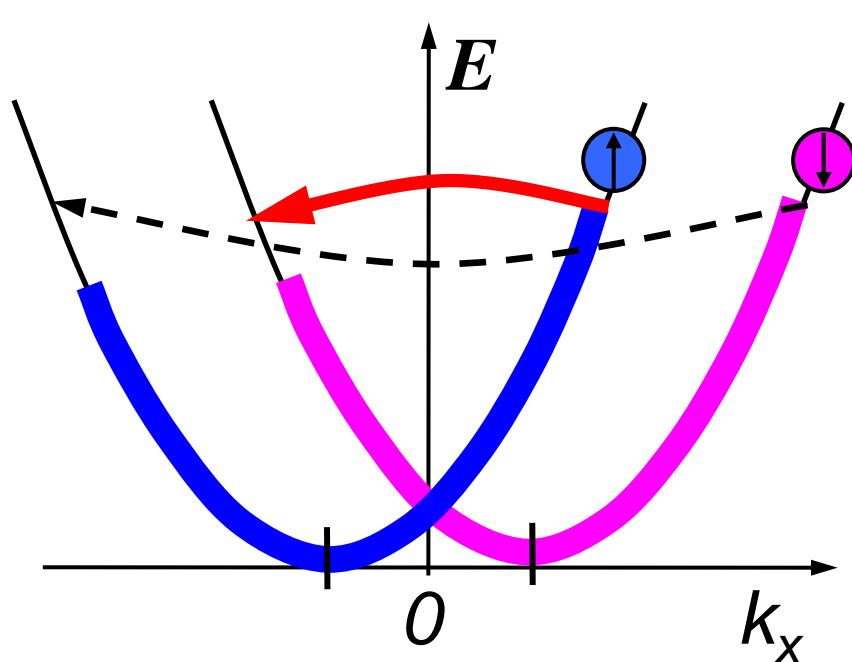
$$\mathbf{k}_{dr} = \frac{e\tau}{\hbar} \boldsymbol{\varepsilon}$$



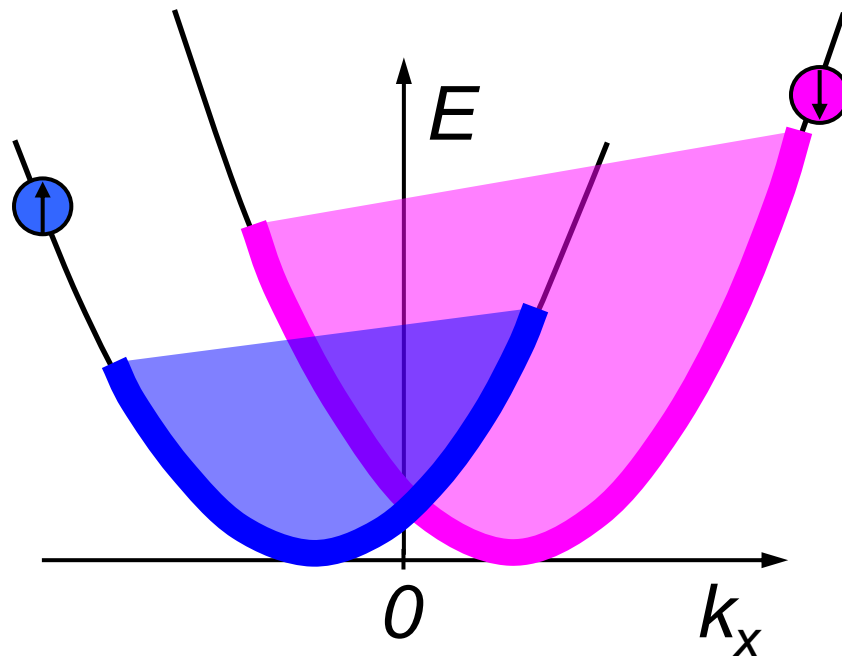
$$n_+ = n_-$$

Спиновая релаксация

Спиновая ориентация током при спин-зависимом рассеянии

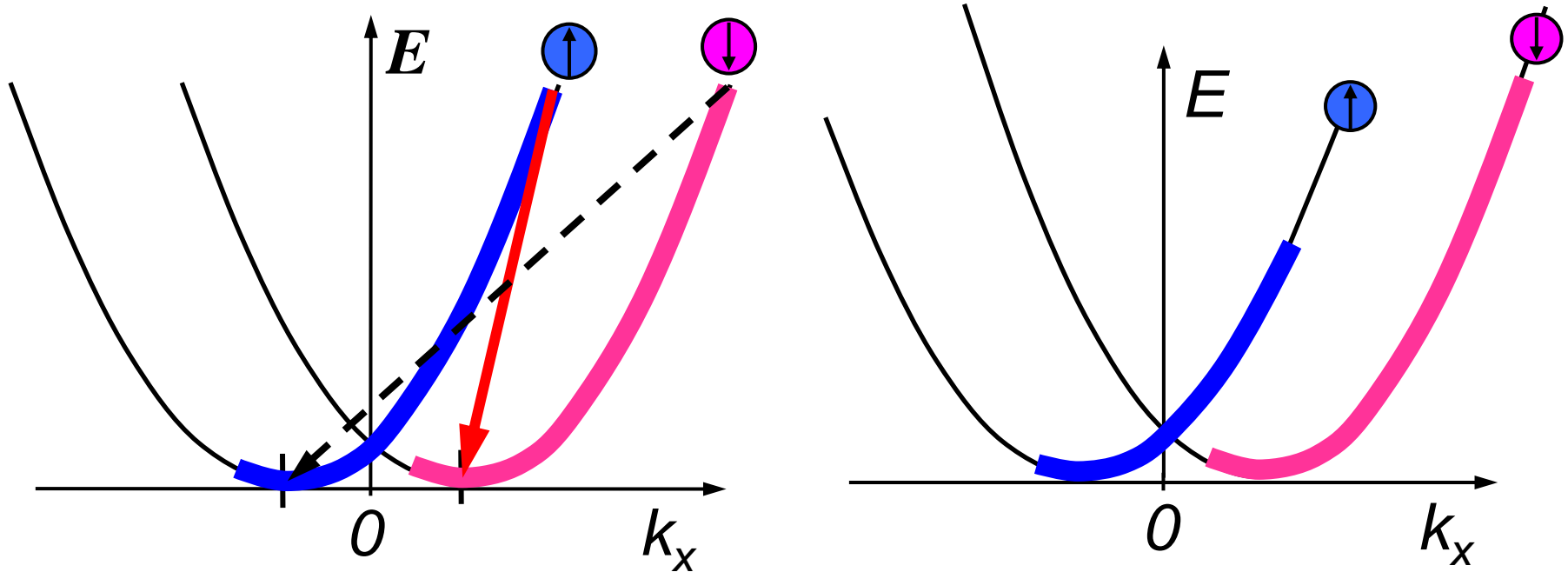


Темп переходов
с переворотом спина
зависит от $q_x = k'_x - k_x$



$$S_z \neq 0$$

Спиновая ориентация током в режиме стриминга



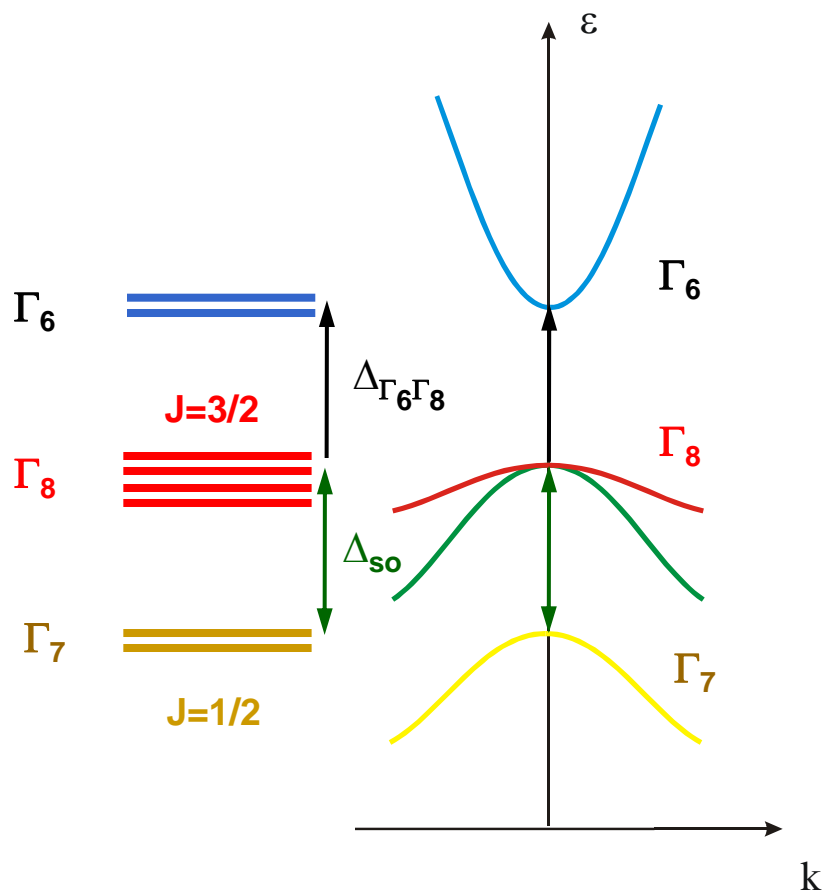
$$S_z \neq 0$$

Спиновые явления в полупроводниках и топологических изоляторах

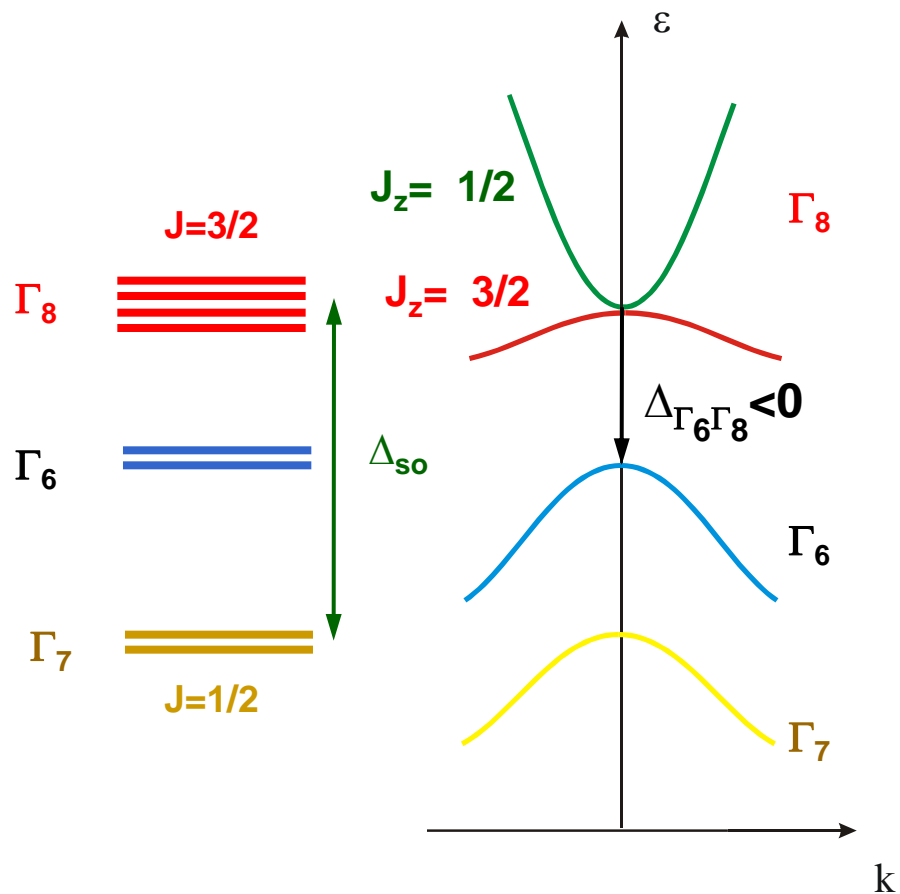
1. Оптическая ориентация спинов. Эффект Ханле
2. Механизмы спиновой релаксации
3. Спиновая ориентация электрическим током
4. Топологические изоляторы

HgTe: бесщелевой полупроводник

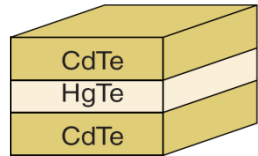
Обычные полупроводники:
III-V (GaAs), II-VI (CdTe)



HgTe:
инвертированная зонная структура

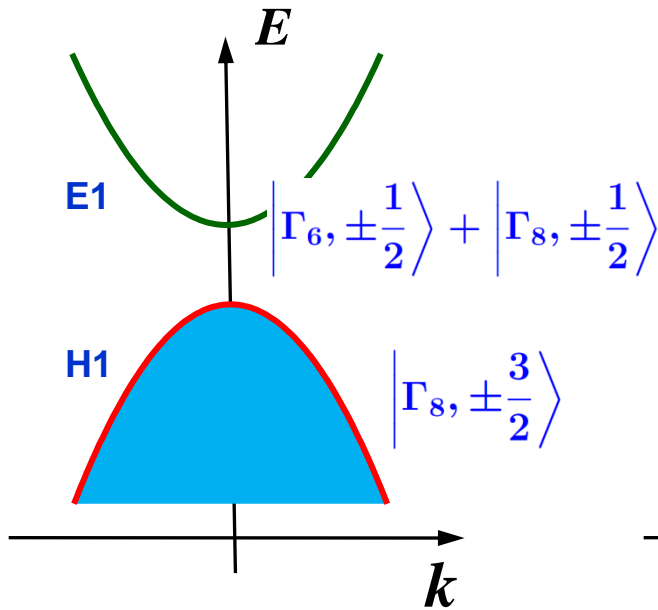


Квантовые ямы HgTe/CdTe

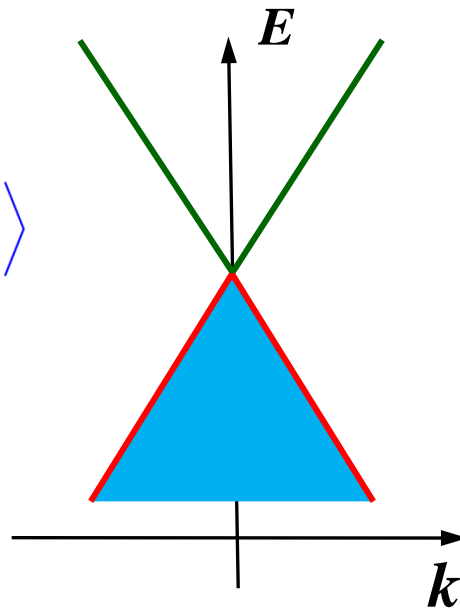


критическая толщина $d_{cr} \approx 6.3 \text{ nm}$

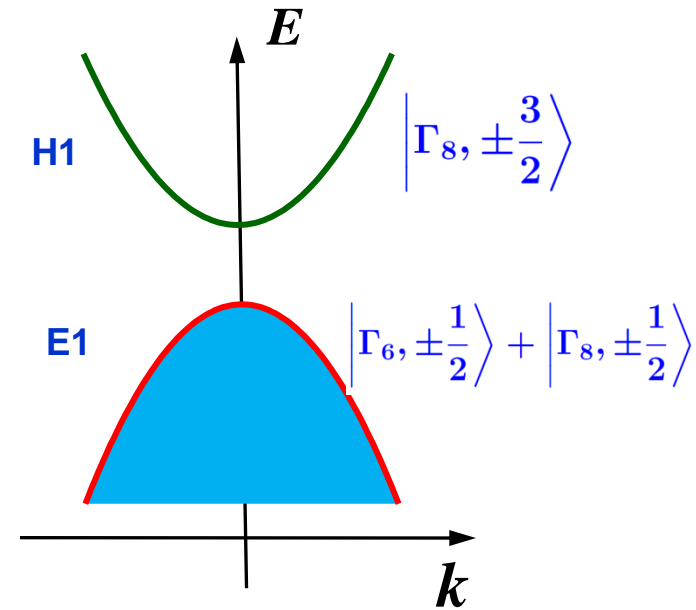
$d < d_{cr}$



$d = d_{cr}$



$d > d_{cr}$



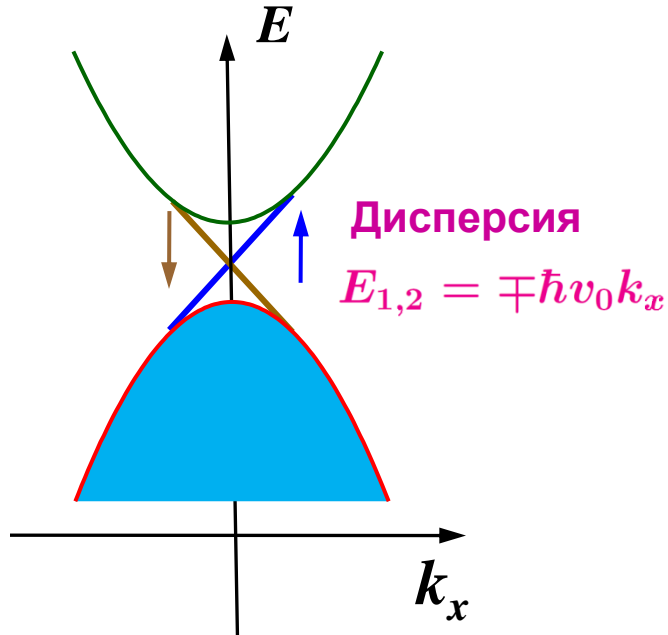
Эффективный 2D гамильтониан

$$\mathcal{H}(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} H(\mathbf{k}) & 0 \\ 0 & H^*(-\mathbf{k}) \end{pmatrix}$$

$$H(\mathbf{k}) = (M - Bk^2)\sigma_z + \hbar v_0 \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{k}$$

$$\mathbf{k} = (k_x, k_y)$$

Краевые состояния



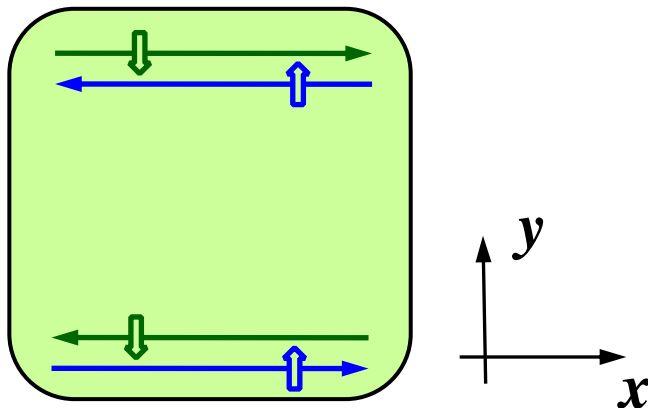
Волновые функции

$$\Psi_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} e^{ik_x x} \phi(y) \quad \Psi_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} e^{ik_x x} \phi(y)$$

Огибающая функция вдоль y

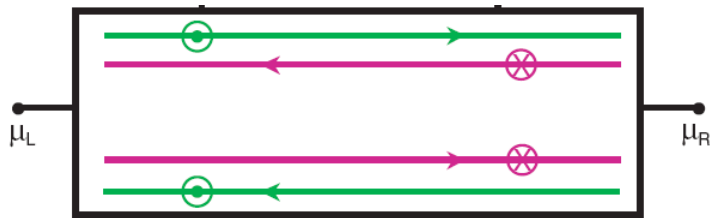
$$\phi(y) = N (e^{-p+y} - e^{-p-y})$$

$$p_{\pm} = \frac{\hbar v_0}{2B} \pm \sqrt{k_x^2 - M/B + (\hbar v_0)^2 / 4B^2}$$

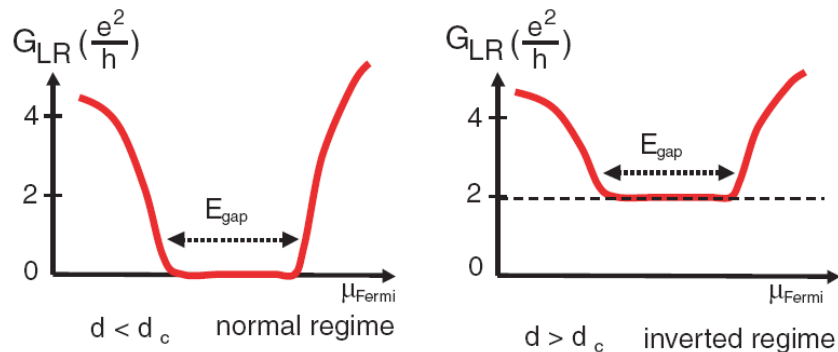


Исследование краевых состояний

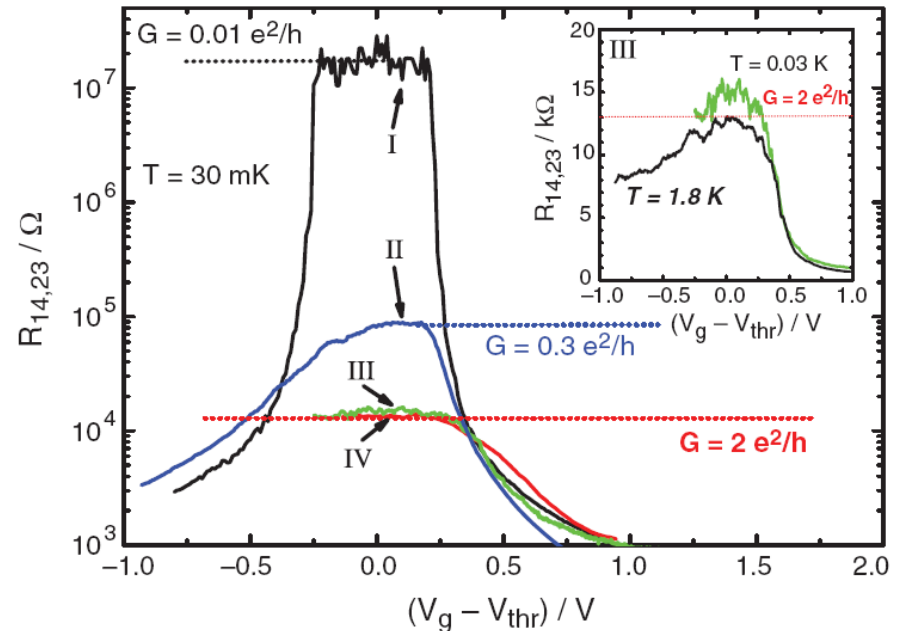
Теория двумерных топологических изоляторов на основе HgTe/CdTe



Проводимость структур



Эксперимент по проводимости



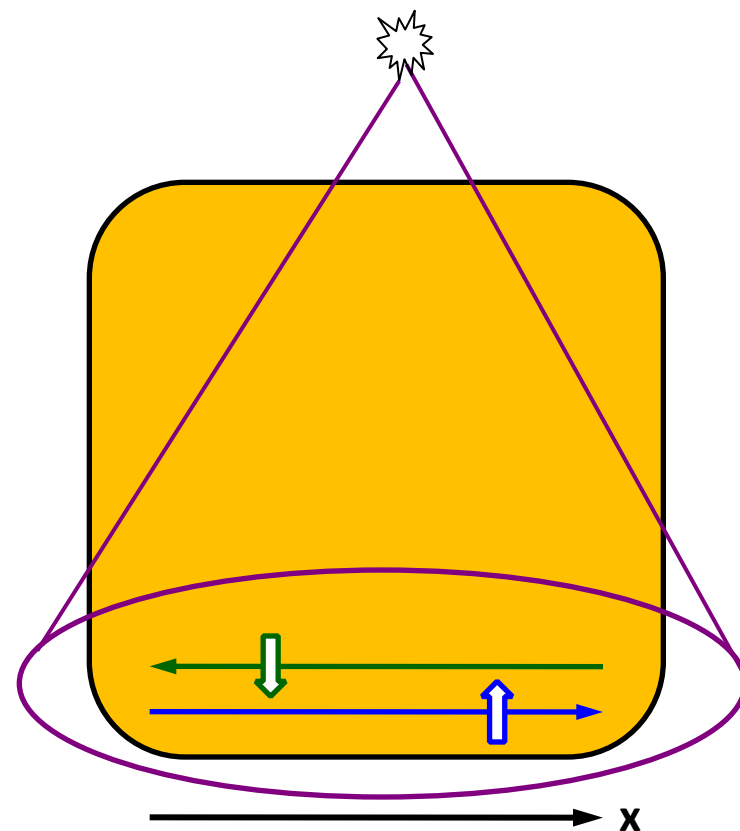
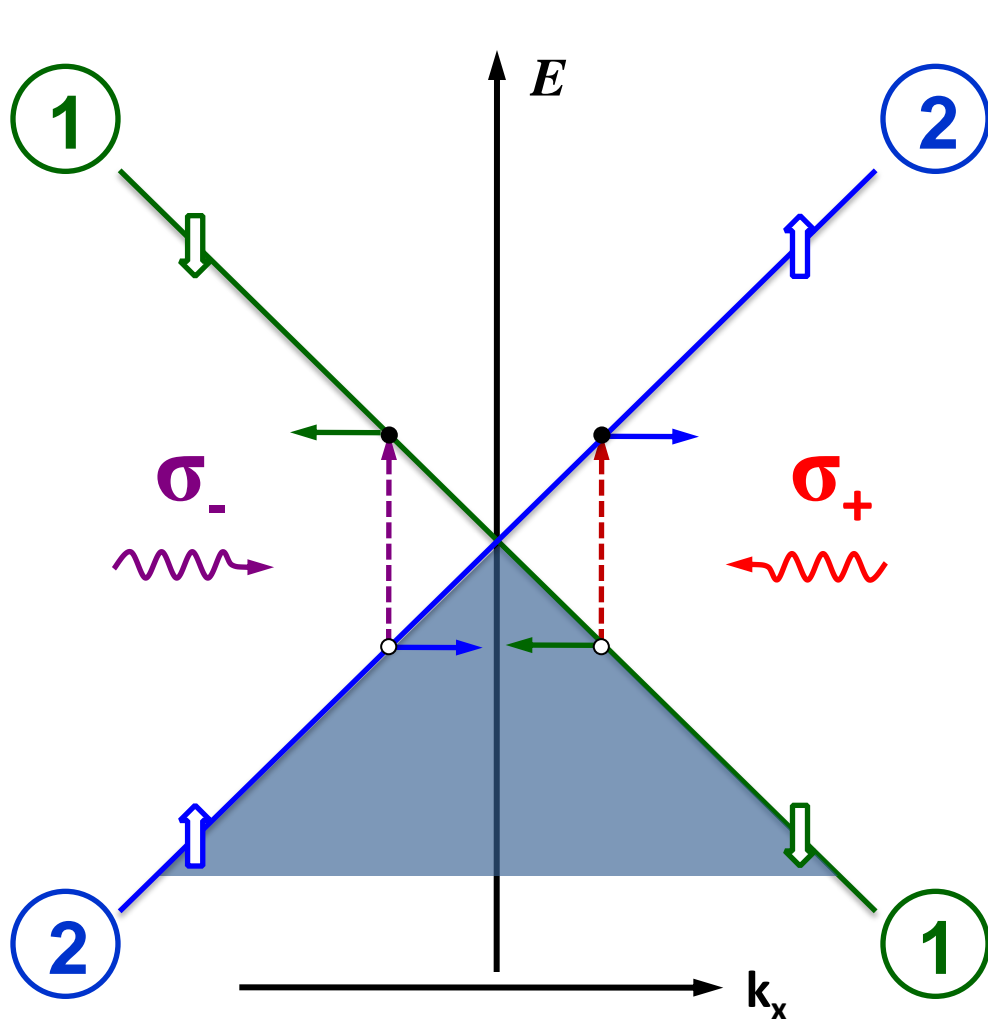
I – normal; III, IV – inverted states

M. König et al., Science **318**, 766 (2007)

B.A. Bernevig, T.L. Hughes, and Sh.-Ch. Zhang,
Science **314**, 1757 (2006)

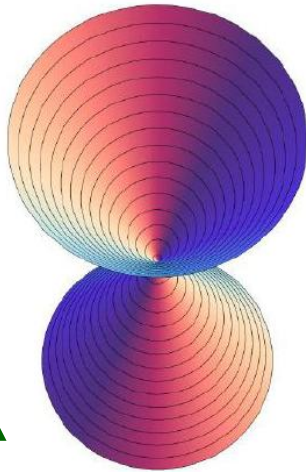
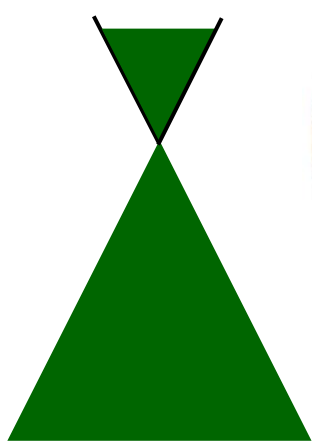
Обзор: M.Z. Hasan and C.L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010)

Краевой циркулярный фототок



$$j_x \propto IP_{circ}$$

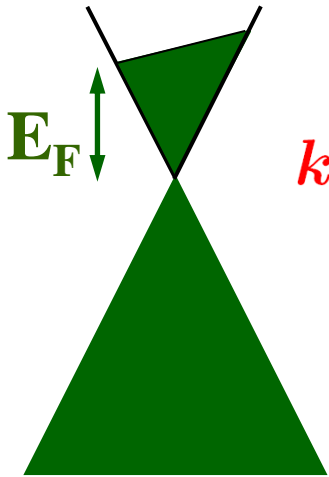
Спиновая ориентация током в 2D топологических изоляторах



BiTe

BiSe

$$\mathcal{H} = \hbar v_0 (\sigma_x k_y - \sigma_y k_x)$$



$$k_{dr} = \frac{e\tau}{\hbar} \mathcal{E}$$

$$s_x = \frac{k_{dr,y}}{2k_F}$$

$$s_y = -\frac{k_{dr,x}}{2k_F}$$

Спиновые явления в полупроводниках и топологических изоляторах

- ✓ **Оптическая ориентация спинов. Эффект Ханле**
- ✓ **Механизмы спиновой релаксации**
- ✓ **Спиновая ориентация электрическим током**
- ✓ **Топологические изоляторы**