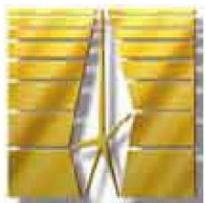


Спиновые явления в полупроводниках и топологических изоляторах

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*



$$\hat{H}_{e-phot} = -\frac{e}{c} A_0 \mathbf{e} \cdot \hat{\mathbf{p}}$$

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

$$e_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, \pm i, 0) \quad \boldsymbol{\sigma}_{\pm}$$

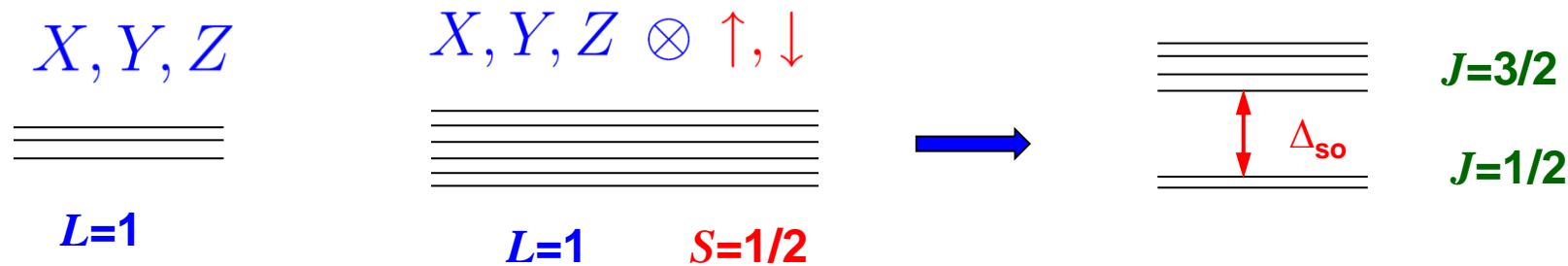
$$\begin{matrix} X, Y, Z \\ \hline \hline \\ L=1 \end{matrix}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\pm}$$

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

$$L_z = \mp 1$$

Спин-орбитальное взаимодействие



Блоховские функции $J=3/2$

$$-\frac{X + iY}{\sqrt{2}} \uparrow \quad -\frac{X + iY}{\sqrt{6}} \downarrow + \sqrt{\frac{2}{3}} Z \uparrow \quad \frac{X - iY}{\sqrt{6}} \uparrow + \sqrt{\frac{2}{3}} Z \downarrow \quad \frac{X - iY}{\sqrt{2}} \downarrow$$

$J_z=+3/2$

$J_z=+1/2$

$J_z=-1/2$

$J_z=-3/2$

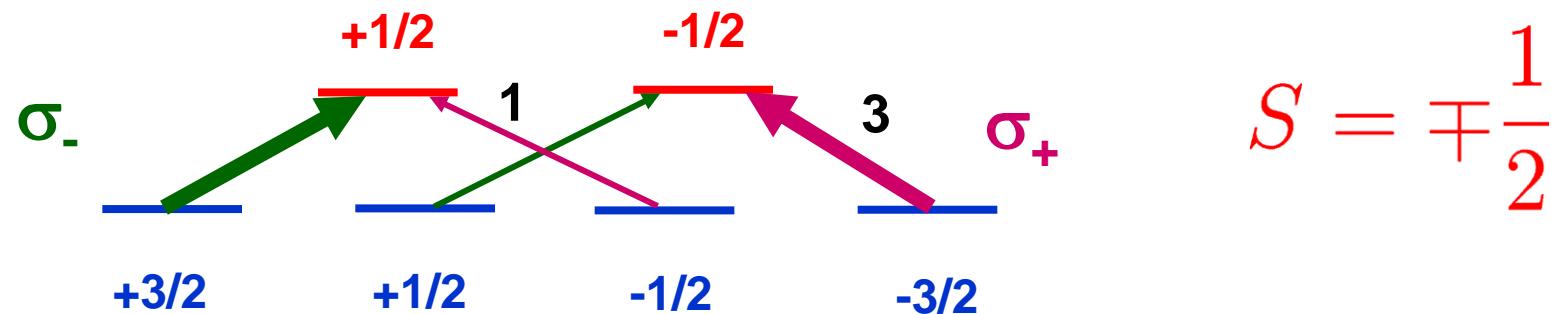
$$\sigma_- \frac{|p_{cv}|^2}{2}$$

$$\sigma_- \frac{|p_{cv}|^2}{6}$$

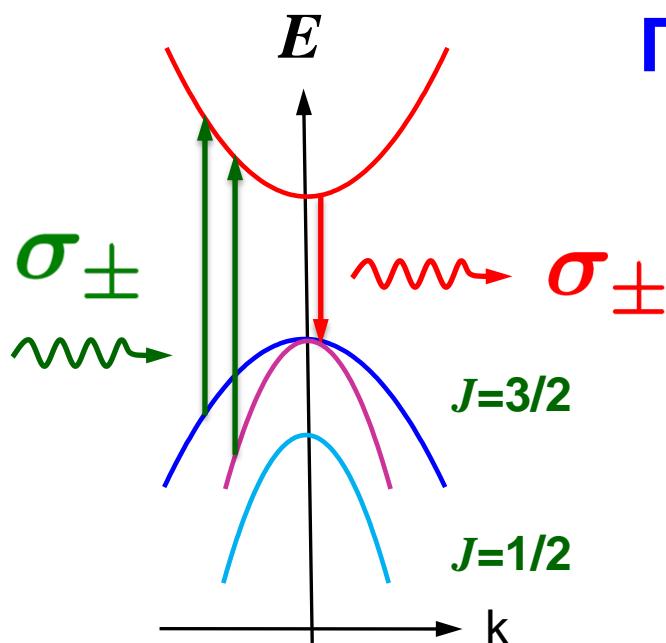
$$\sigma_+ \frac{|p_{cv}|^2}{6}$$

$$\sigma_+ \frac{|p_{cv}|^2}{2}$$

Оптическая ориентация спинов



Поляризованная ФЛ



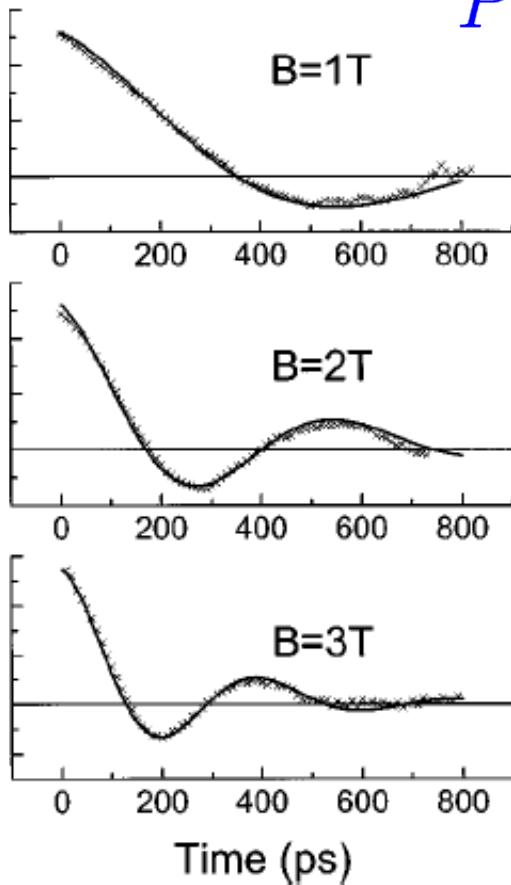
Степень круговой поляризации

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

Спиновая динамика

Кинетика поляризации ФЛ

Circular polarization



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

Время спиновой релаксации τ_s

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

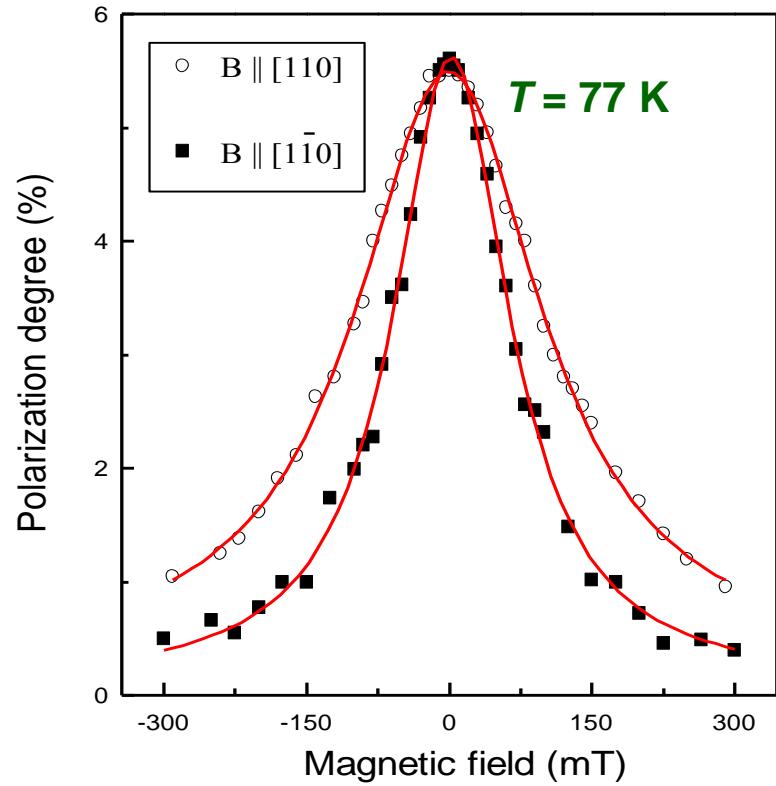
Steady-state PL

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

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

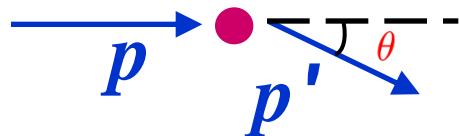
1. Оптическая ориентация спинов. Эффект Ханле
2. Механизмы спиновой релаксации
3. Спиновая ориентация электрическим током
4. Топологические изоляторы

Спиновая релаксация

Поведение спина в отсутствие магнитного поля

Импульс: есть рассеяние

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



Следствие: **релаксация импульса**

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

Спин – аналогично:

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

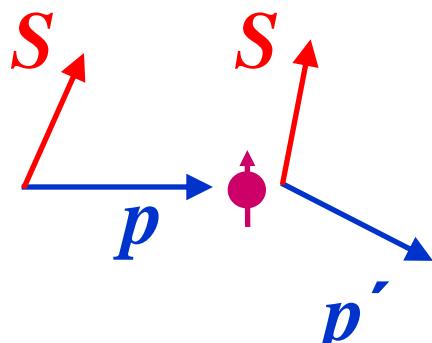
τ_s – время спиновой релаксации

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

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

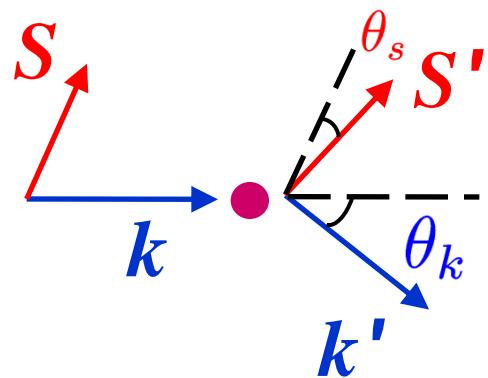
- релятивистский эффект

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

- вращение спина вокруг импульса

Спиновая релаксация при рассеянии

При столкновениях меняется не только \mathbf{k} , но и \mathbf{S}



Угол поворота

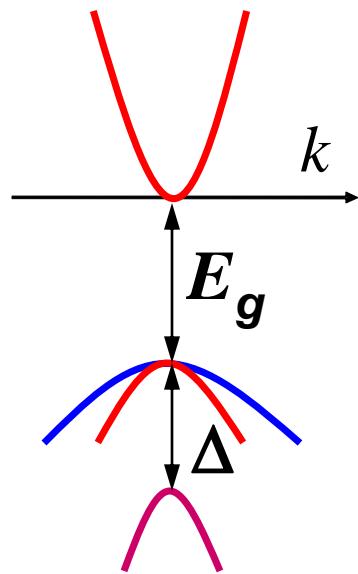
$$\theta_s \approx \gamma \theta_k \ll \theta_k$$

механизм Эллиота-Яфета

R.J. Elliott (1954)

Y. Yafet (1963)

Время спиновой релаксации по механизму Эллиота-Яфета



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

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

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

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

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

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:

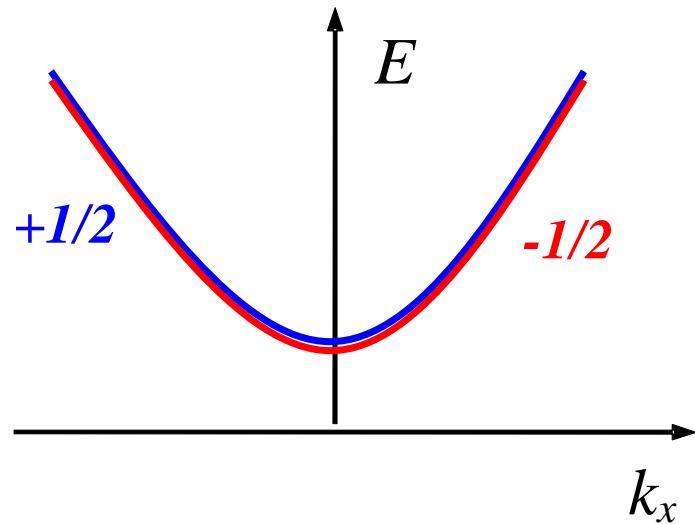
$$E_{\uparrow}(\mathbf{k}) = E_{\downarrow}(-\mathbf{k})$$

Пространственная
инверсия:

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

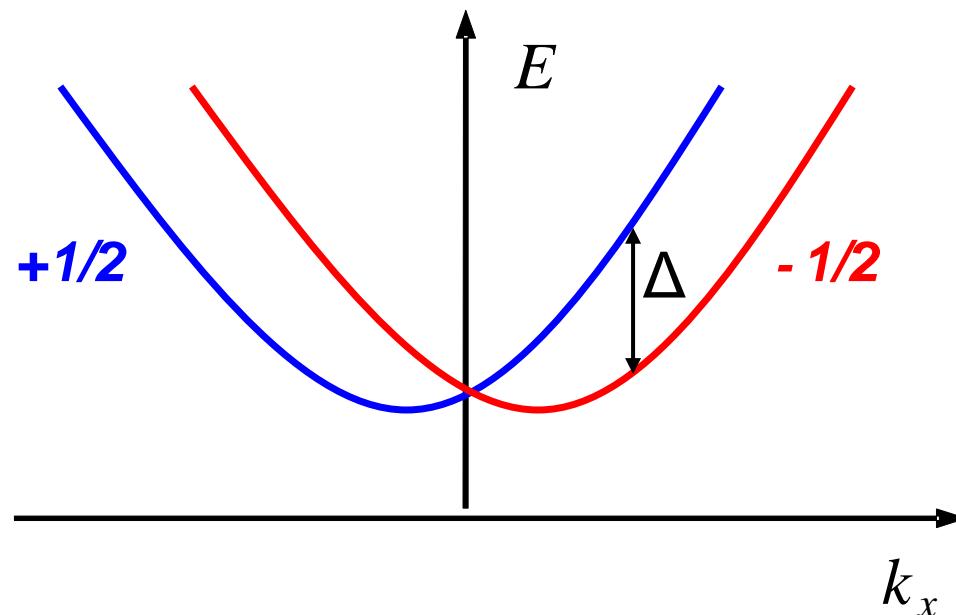
**В системах
с центром инверсии**

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



Спиновые расщепления в гетероструктурах

В отсутствие центра инверсии

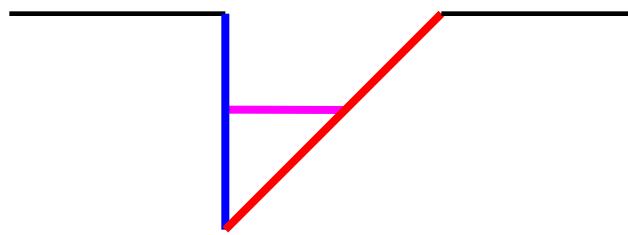


$$\hat{\mathcal{H}} \propto \hat{\sigma}_i k_j, \hat{\sigma}_i k_j^3$$

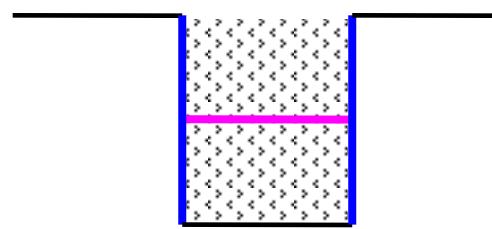
$$\hat{\mathcal{H}} = \alpha(\hat{\sigma} \times \mathbf{k}) \cdot \mathbf{n}$$

2D полупроводники

Несимметричная
квантовая яма:
SIA



Квантовая яма
из полупроводника
без центра инверсии:
BIA



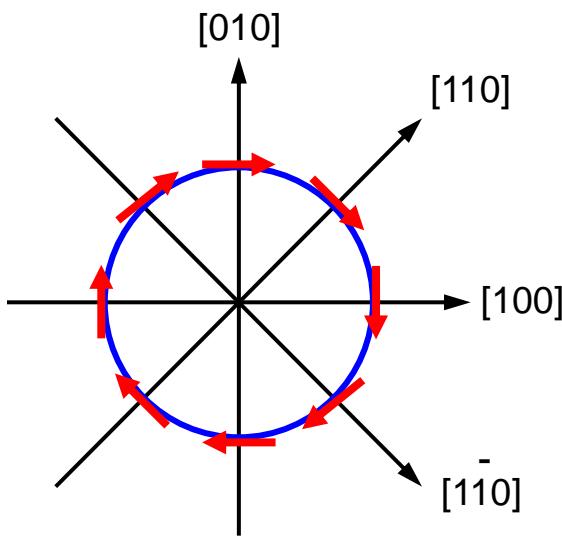
$$\hat{\mathcal{H}}_{\text{SIA}} = \alpha(\hat{\sigma}_x k_y - \hat{\sigma}_y k_x) \quad \hat{\mathcal{H}}_{\text{BIA}} = \beta(\hat{\sigma}_x k_x - \hat{\sigma}_y k_y)$$

$$\Delta = 2\alpha k$$

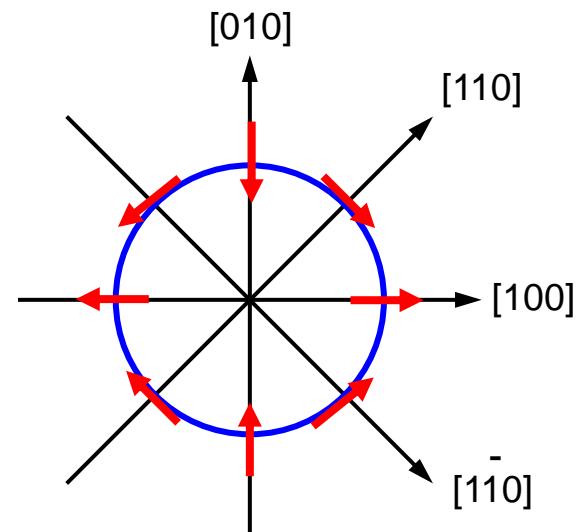
$$\Delta = 2\beta k$$

Эффективное магнитное поле

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



SIA



BIA

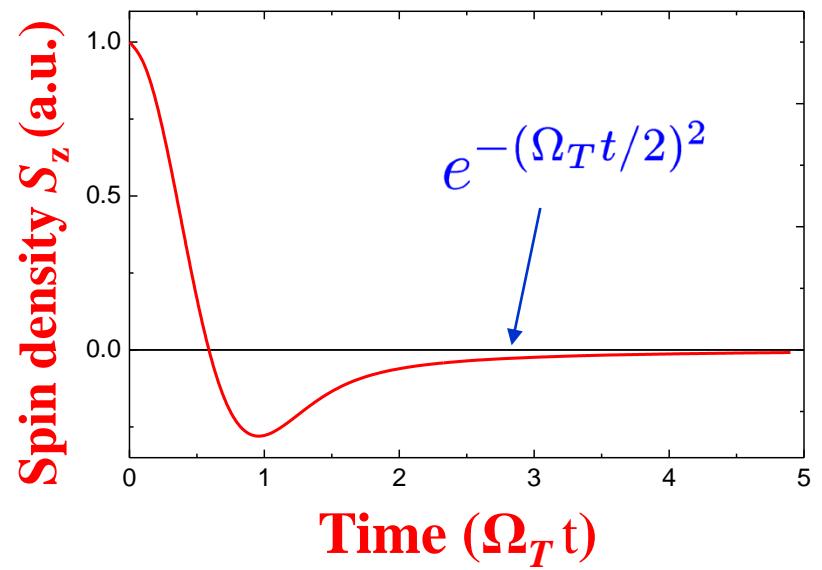
Спиновая динамика

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

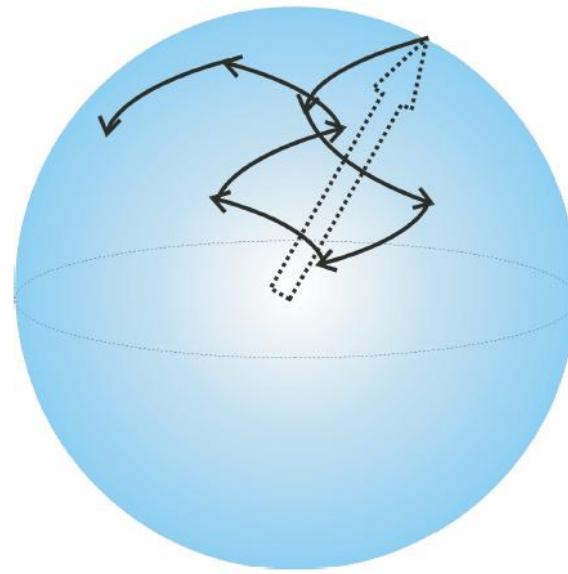
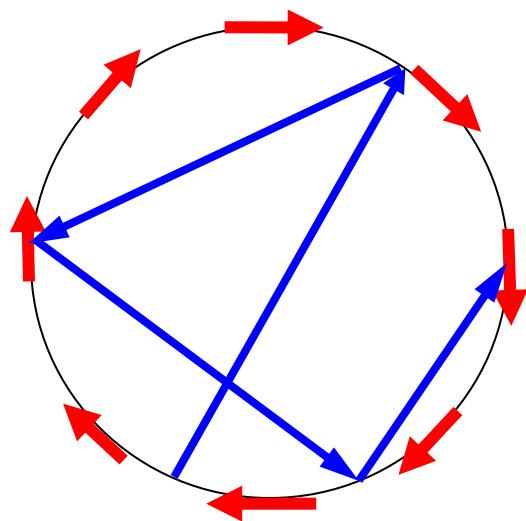
$$S_z(t) = S_z(0) \cos \Omega t$$

2D большемановские электроны:

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



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



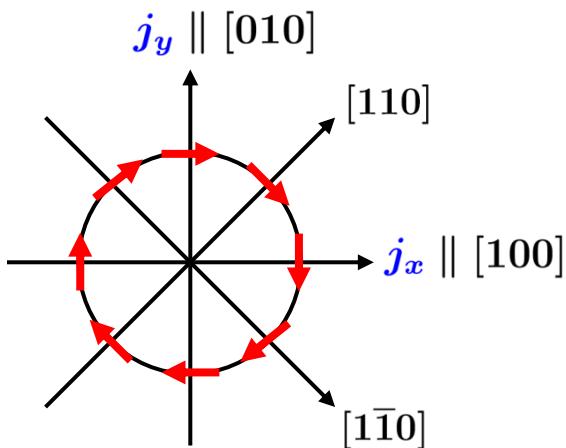
Спиновая ориентация током в квантовых ямах

$$S_i = Q_{im} j_m$$

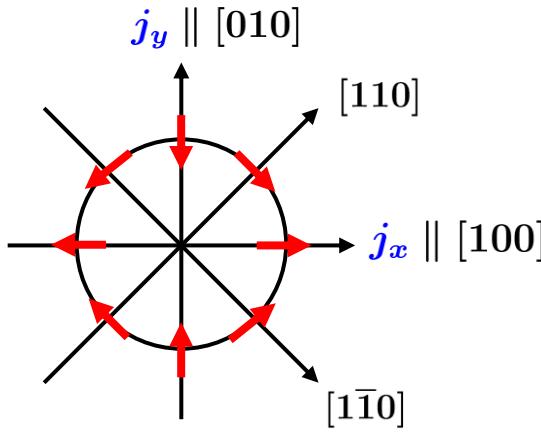
аксиальный
вектор

полярный
вектор

SIA

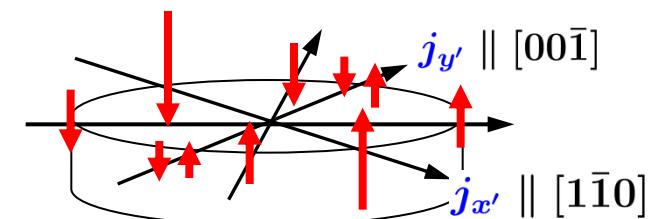


(001) QWs



BIA

(110) QWs



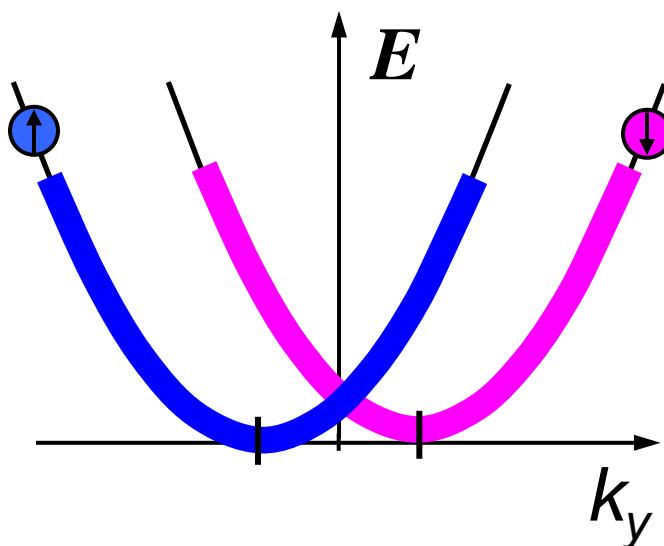
Эффект электрического поля

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

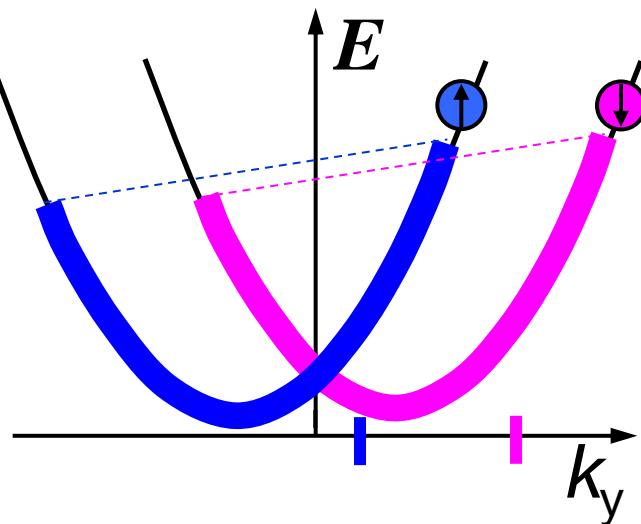
$$\Delta_{\text{so}}(\mathbf{k}) = 2\beta k_y$$

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

$$\mathbf{k}_{\text{dr}} = \frac{e\tau}{\hbar} \mathcal{E}$$

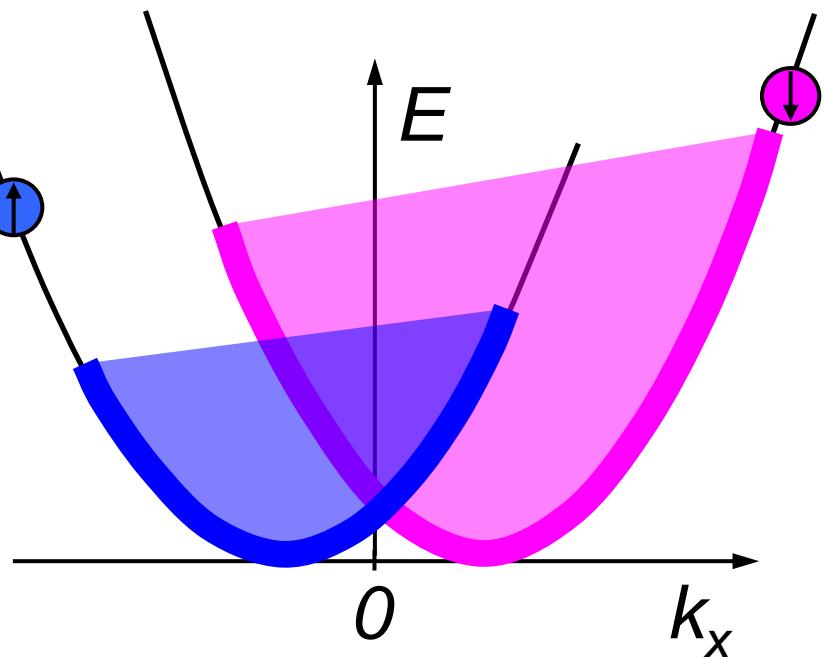
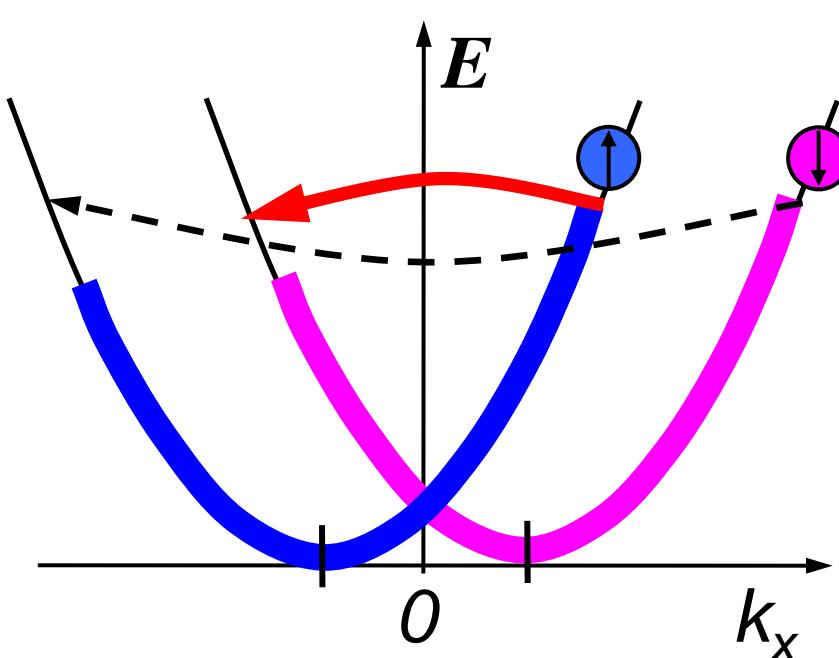


$$n_+ = n_-$$



Спиновая релаксация

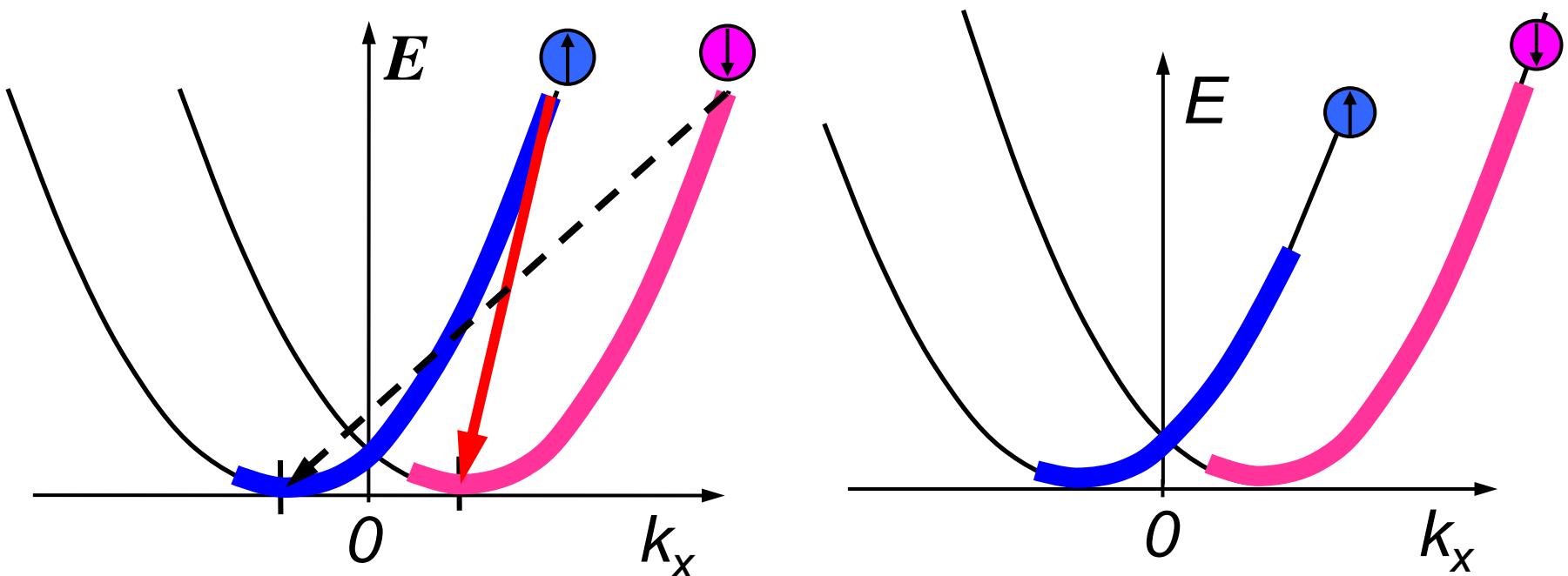
Спиновая ориентация током при спин-зависимом рассеянии



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

$$S_z \neq 0$$

Спиновая ориентация током в режиме стриминга



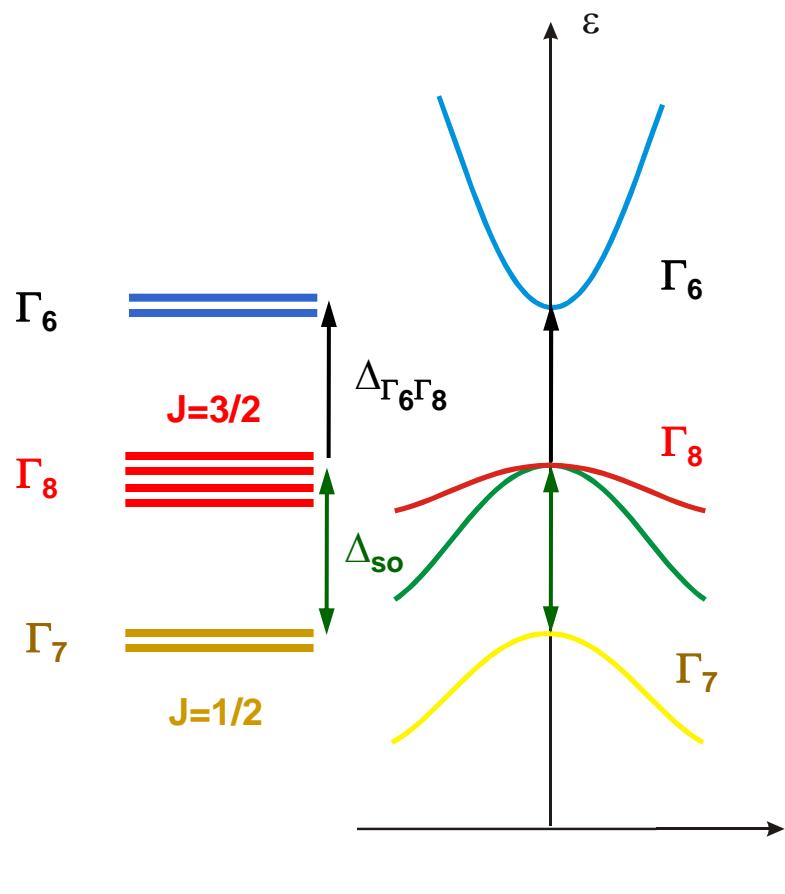
$$S_z \neq 0$$

Спиновые явления в полупроводниках и топологических изоляторах

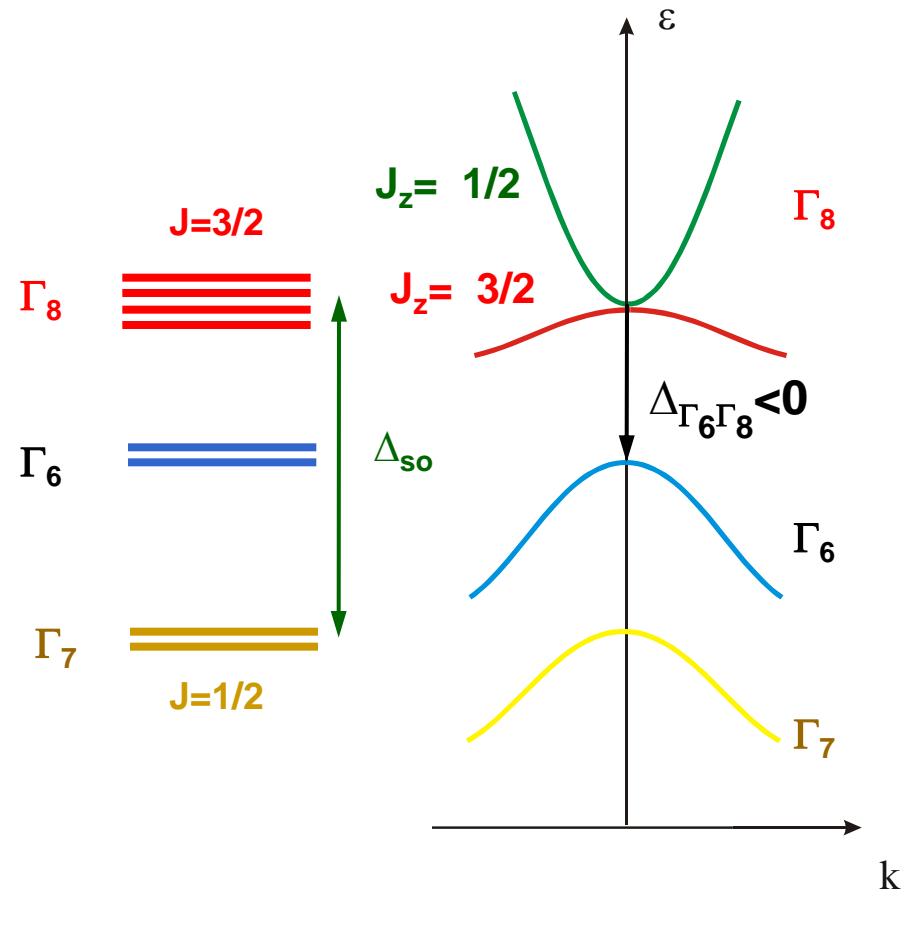
1. Оптическая ориентация спинов. Эффект Ханле
2. Механизмы спиновой релаксации
3. Спиновая ориентация электрическим током
4. Топологические изоляторы

HgTe: бесщелевой полупроводник

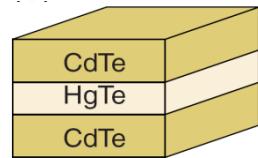
Обычные полупроводники:
III-V (GaAs), II-VI (CdTe)



HgTe:
инвертированная зонная структура

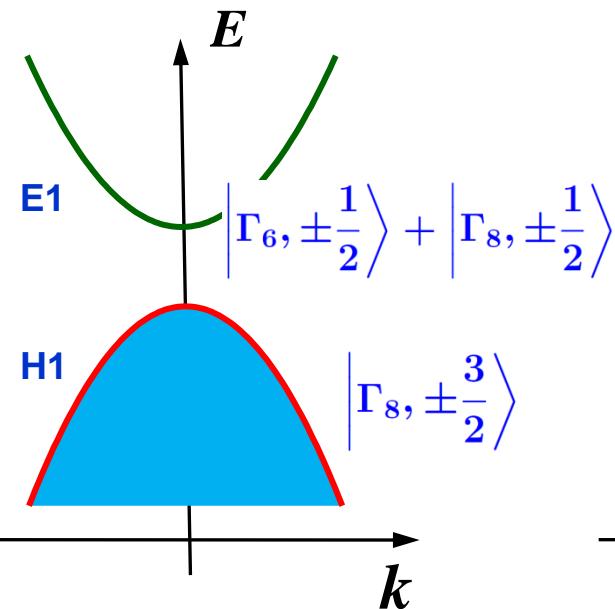


Квантовые ямы HgTe/CdTe

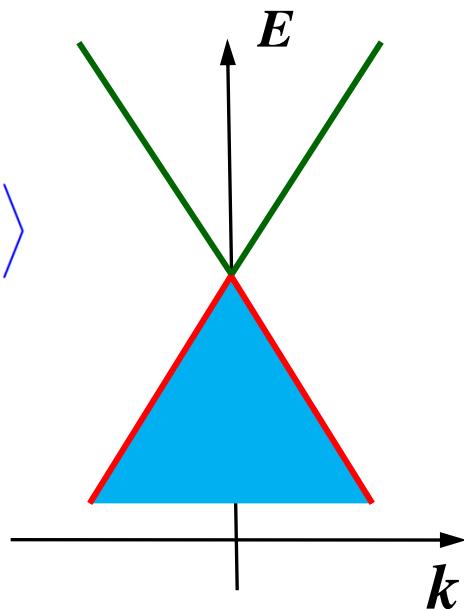


критическая толщина $d_{cr} \approx 6.3 \text{ nm}$

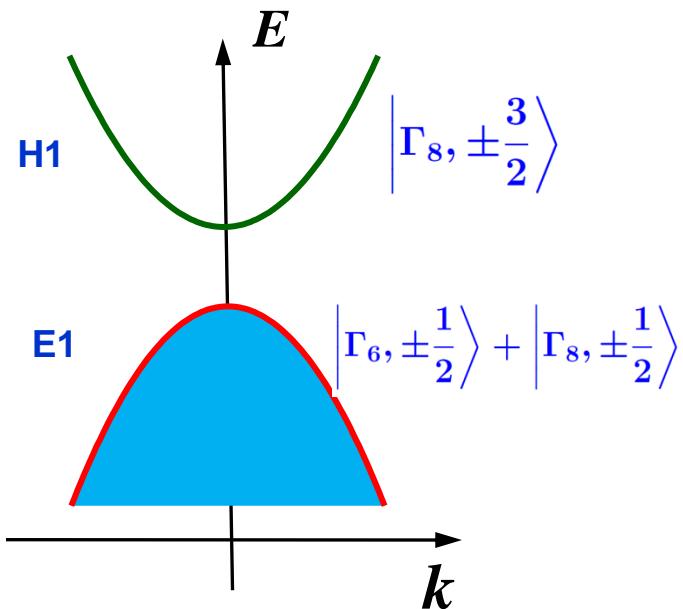
$d < d_{cr}$



$d = d_{cr}$



$d > d_{cr}$

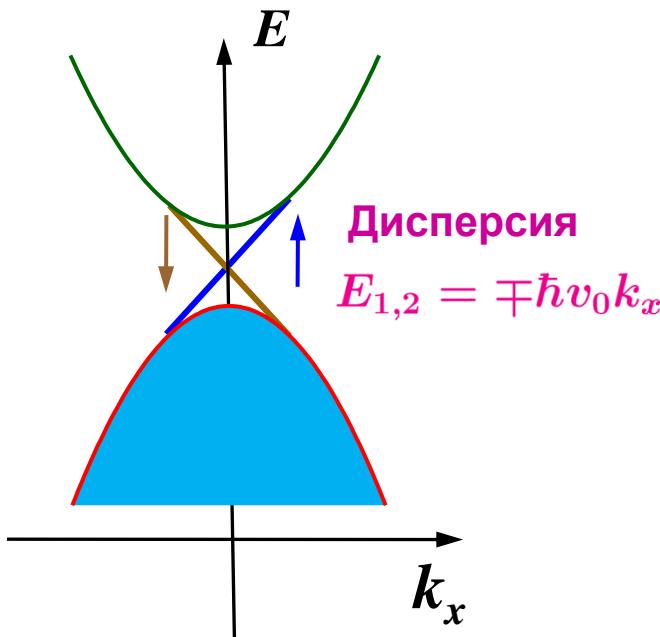


Эффективный 2D гамильтониан

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

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

Краевые состояния

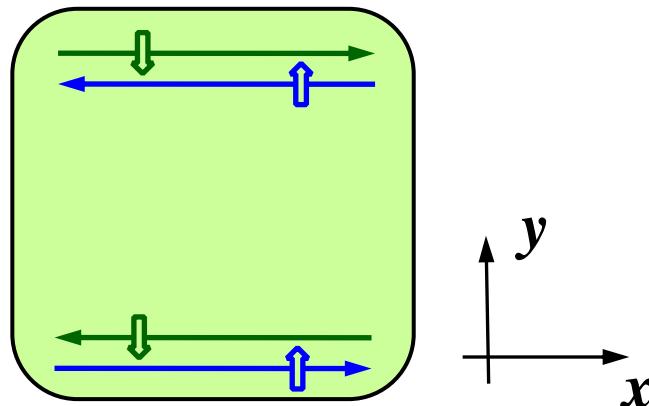


Волновые функции

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

Огибающая функция вдоль y

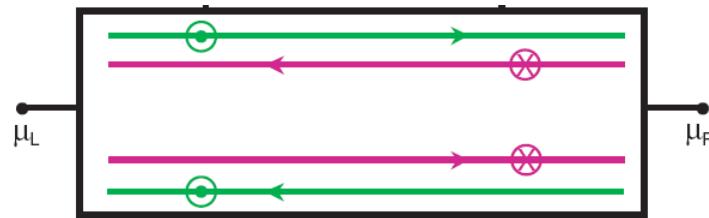
$$\phi(y) = N (e^{-p+y} - e^{-p-y})$$



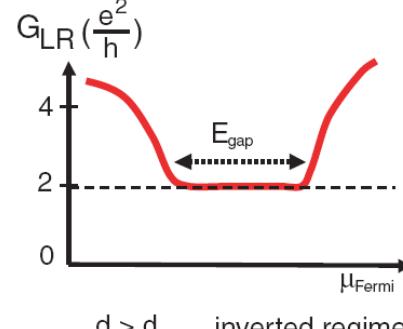
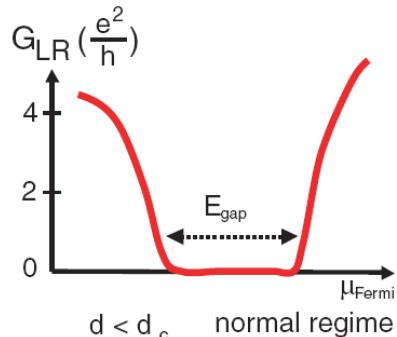
$$p_{\pm} = \frac{\hbar v_0}{2B} \pm \sqrt{k_x^2 - M/B + (\hbar v_0)^2/4B^2}$$

Исследование краевых состояний

Теория двумерных топологических изоляторов на основе HgTe/CdTe

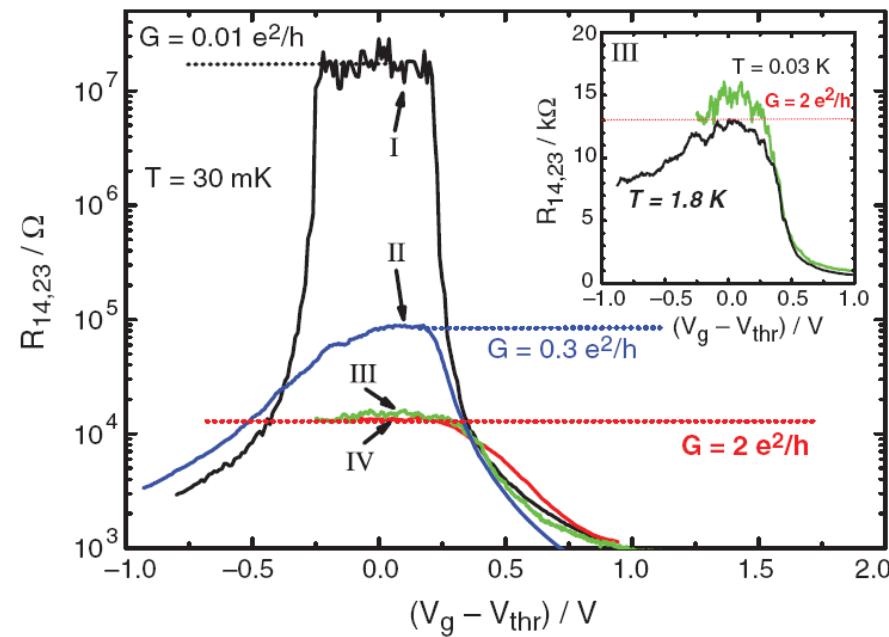


Проводимость структур



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

Эксперимент по проводимости

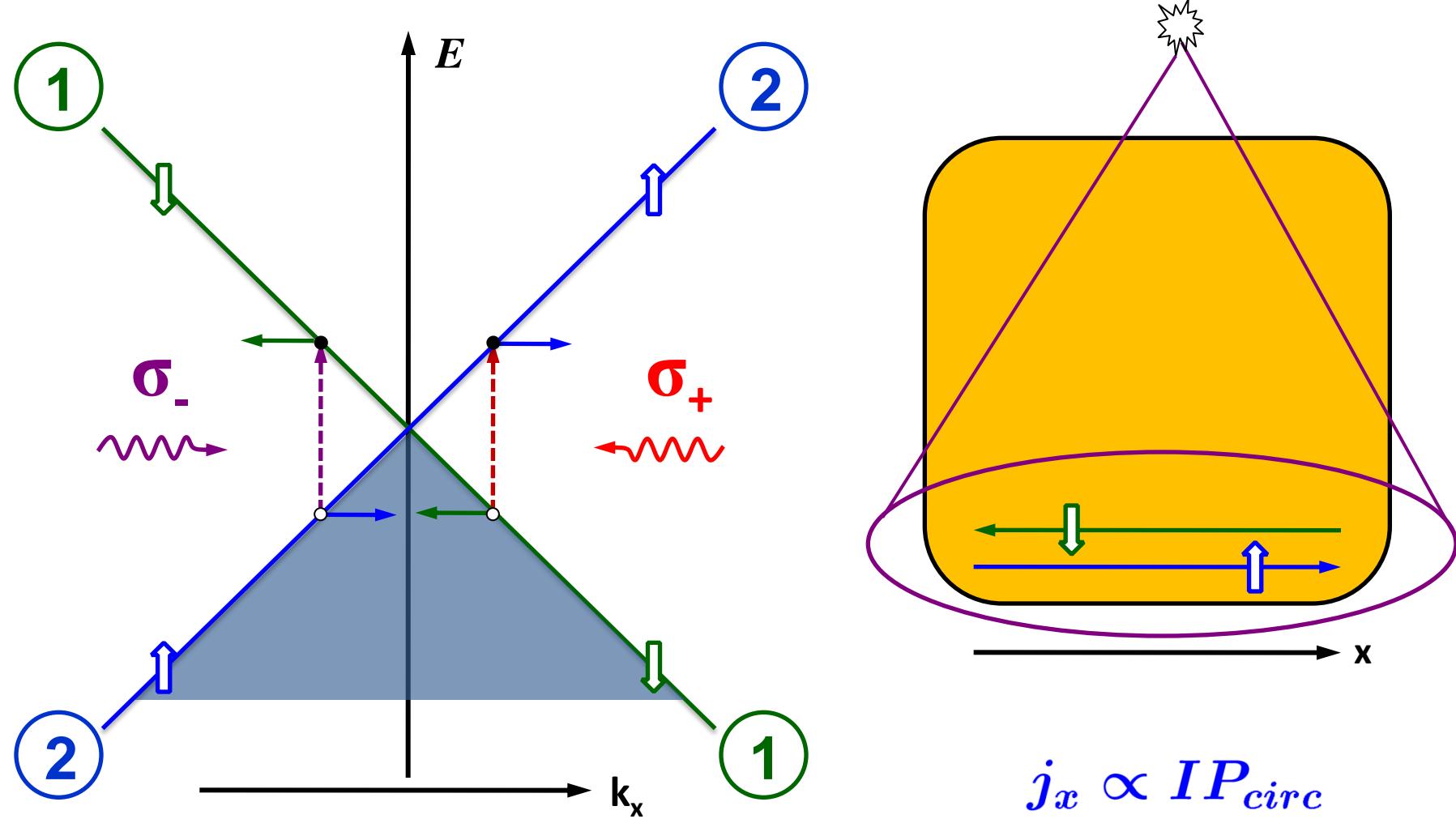


I – normal; III, IV – inverted states

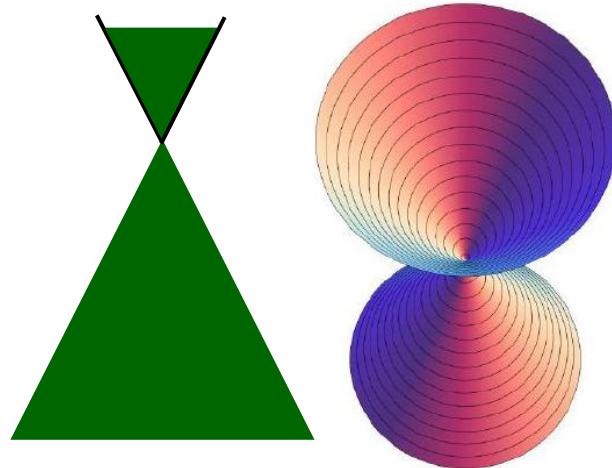
M. König et al., Science 318, 766 (2007)

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

Краевой циркулярный фототок

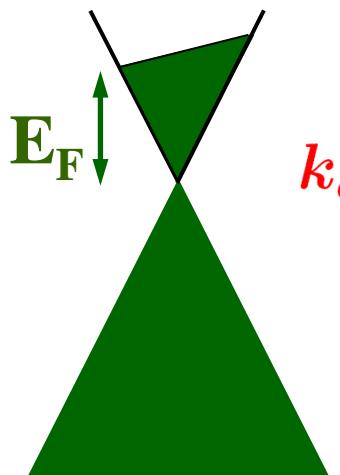


Спиновая ориентация током в 2D топологических изоляторах



BiTe
BiSe

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



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

$$s_x = \frac{k_{\text{dr},y}}{2k_F} \quad s_y = -\frac{k_{\text{dr},x}}{2k_F}$$

L.E. Golub and E.L. Ivchenko, Phys. Rev. B (2011)

Спиновые явления в полупроводниках и топологических изоляторах

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