

Люминесценция графена в сильном ТГц поле

*И.В. Оладышкин, Ю.А. Сергеев, С.Б. Бодров, А.И. Корытин,
М.Д. Токман, А.Н. Степанов.*



**Институт прикладной физики Российской академии наук
(ИПФ РАН), Нижний Новгород**

План сообщения

- I. Введение: неравновесные электроны в графене
- II. Аналог переходов Ландау-Зинера
- III. Идея эксперимента по спонтанной оптической эмиссии в ТГц поле
- IV. Результаты измерений, интерпретация
- V. Заключение

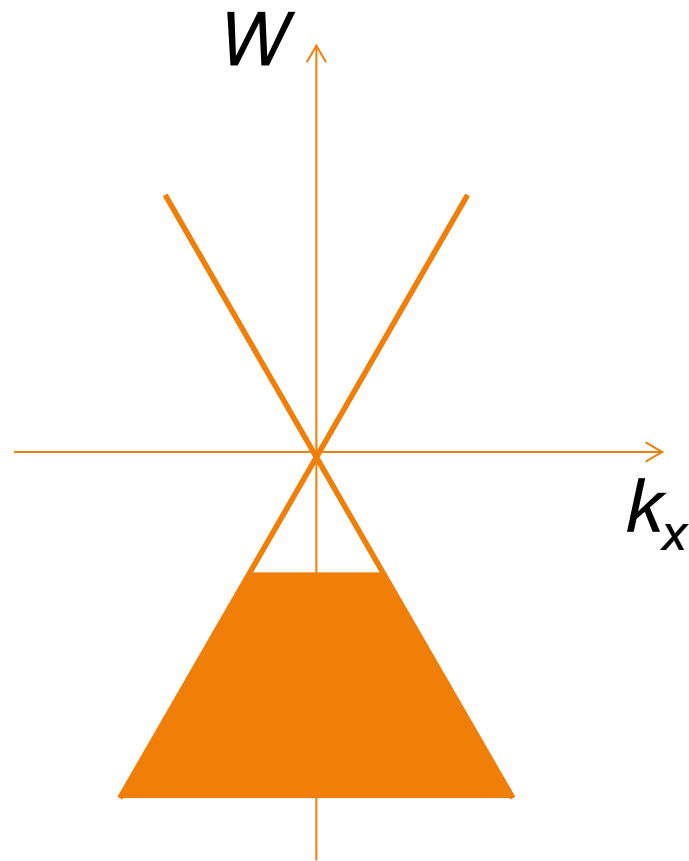
Введение

Линейный закон дисперсии носителей



сильная нелинейность?

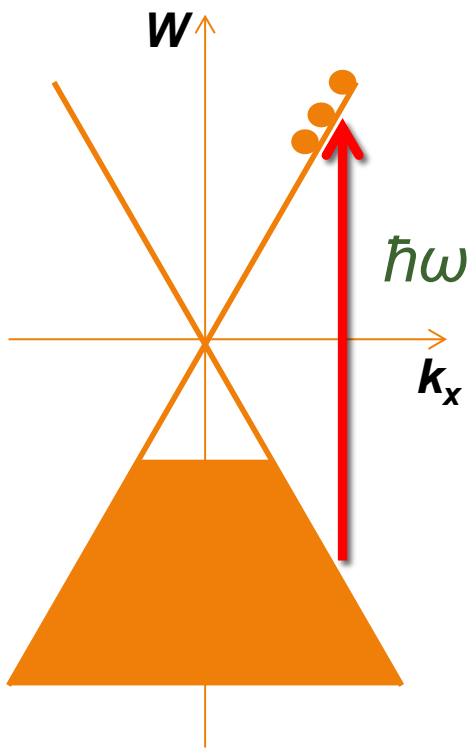
$$W_{c,v} = \pm \hbar v_F \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$



Введение

- Неравновесная динамика электронов

Возбуждение

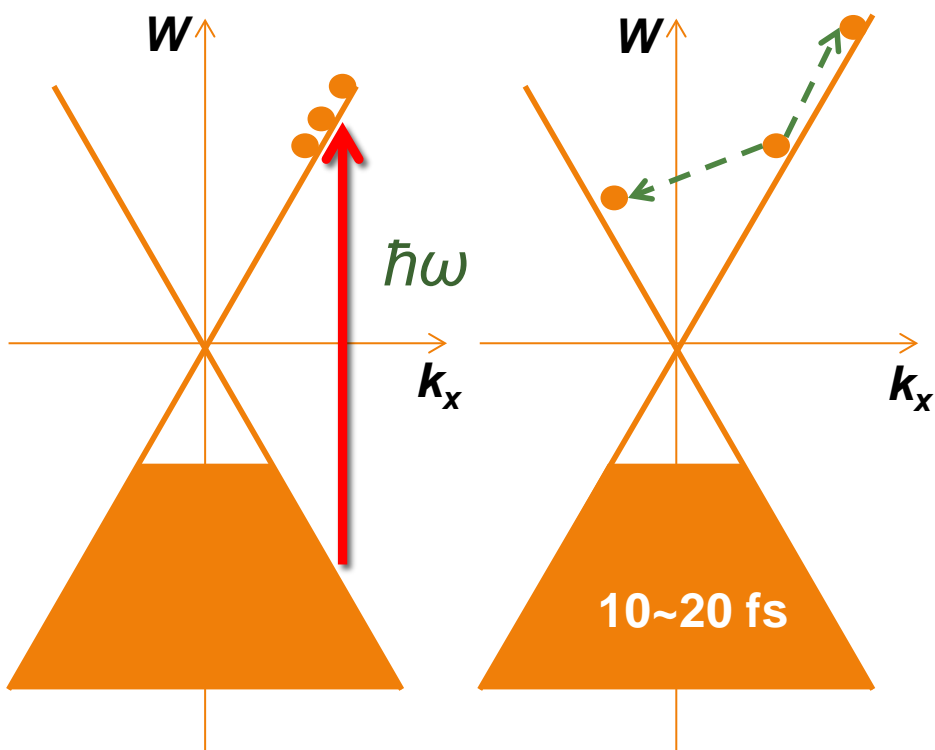


Введение

- Неравновесная динамика электронов

Возбуждение

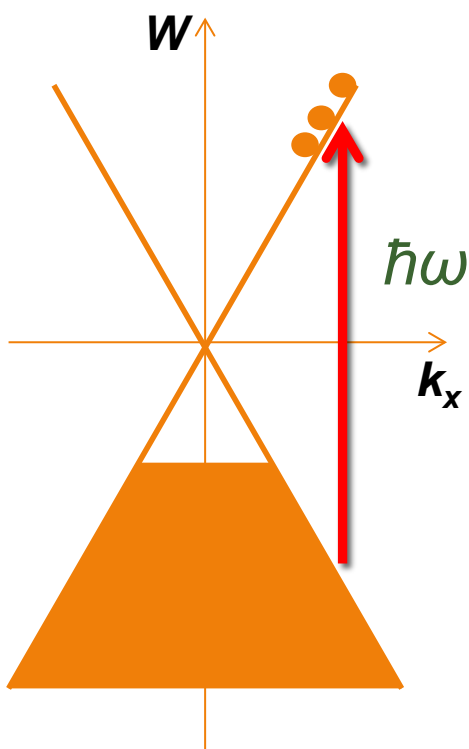
Рассеяние



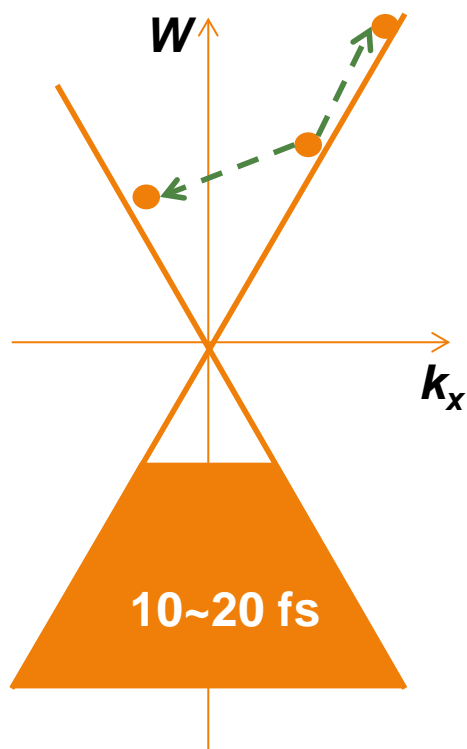
Введение

- Неравновесная динамика электронов

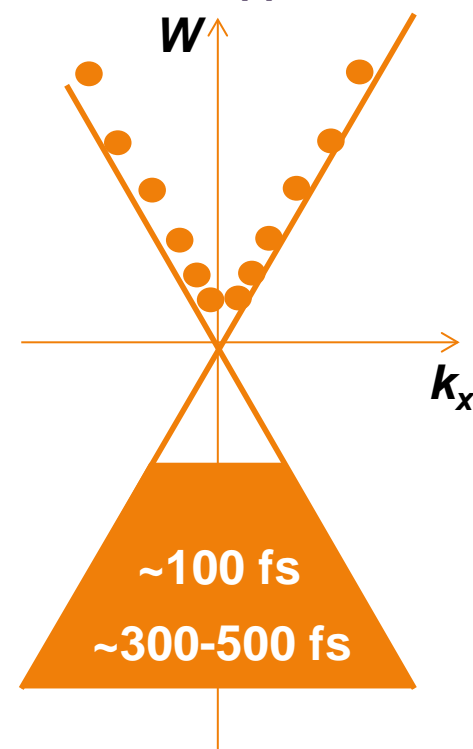
Возбуждение



Рассеяние



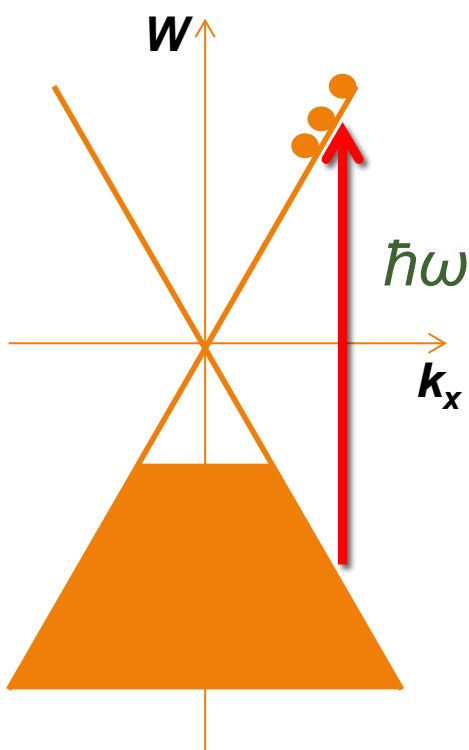
Термализация и охлаждение



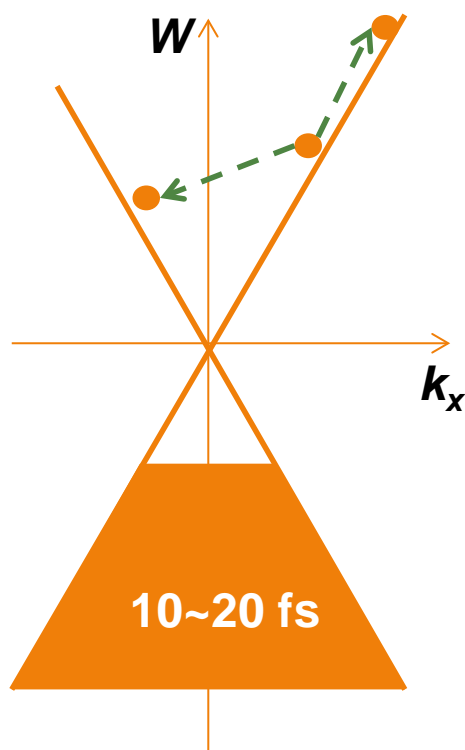
Введение

- Неравновесная динамика электронов

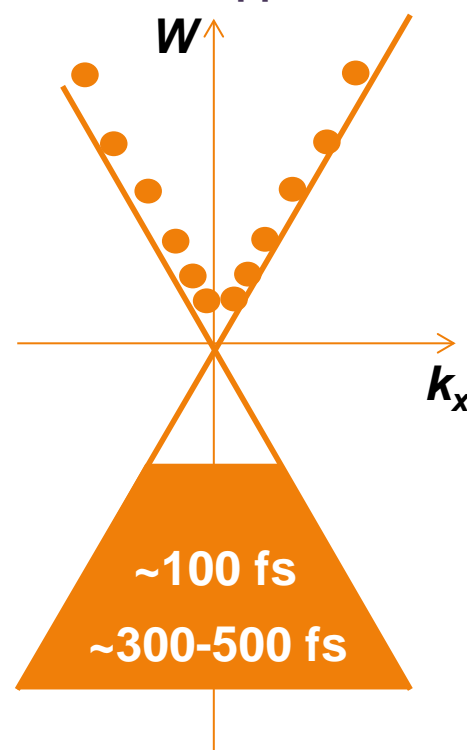
Возбуждение



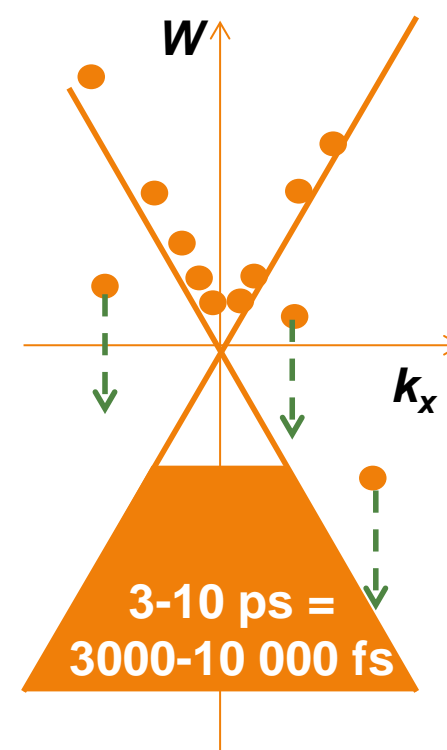
Рассеяние



Термализация и охлаждение



Рекомбинация



Введение

- Неравновесная динамика электронов

Возбуждение

Рассеяние

Термализация
и охлаждение

Рекомбинация

W

W

W

W

$\hbar\omega$

k_x

k_x

k_x

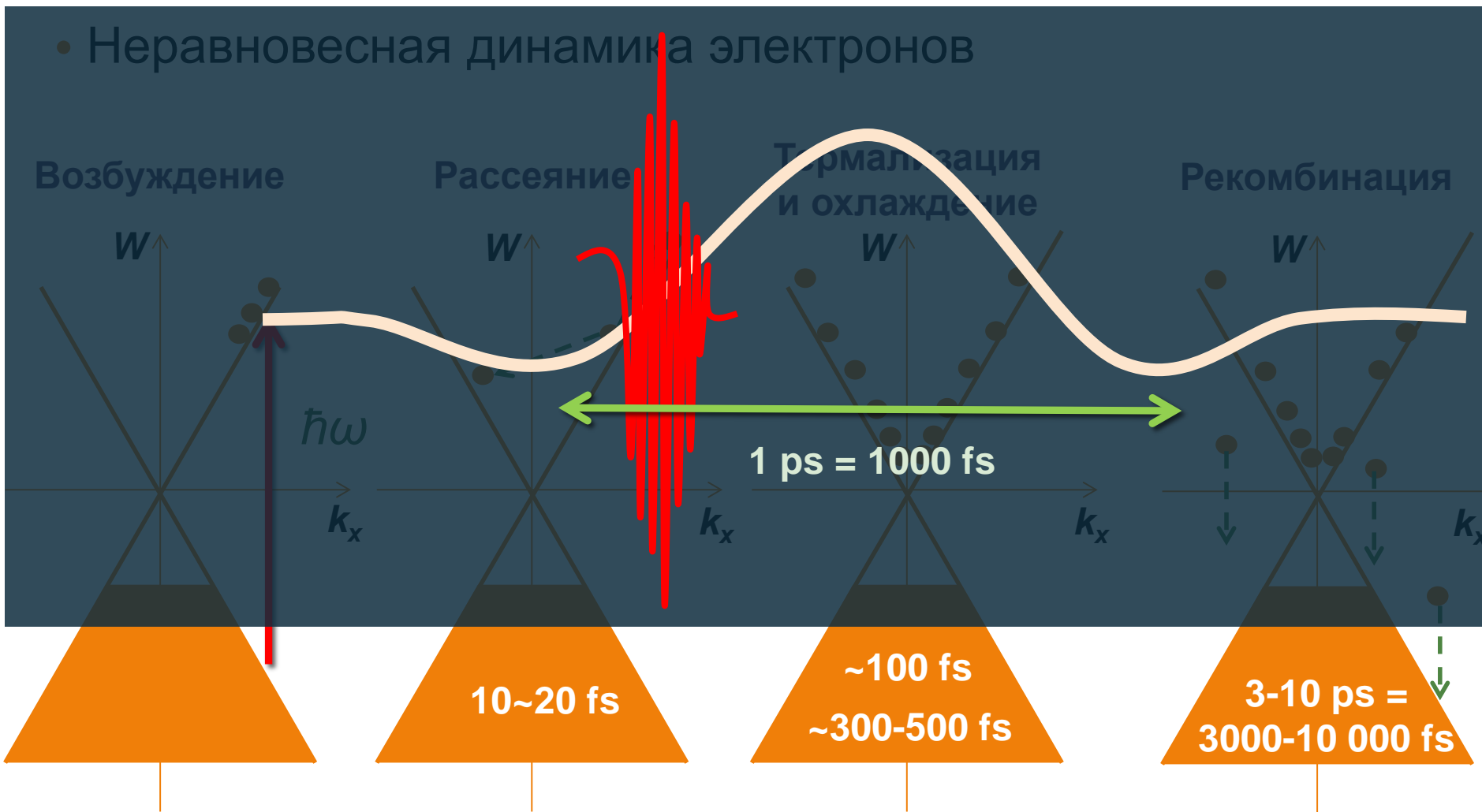
k_x

1 ps = 1000 fs

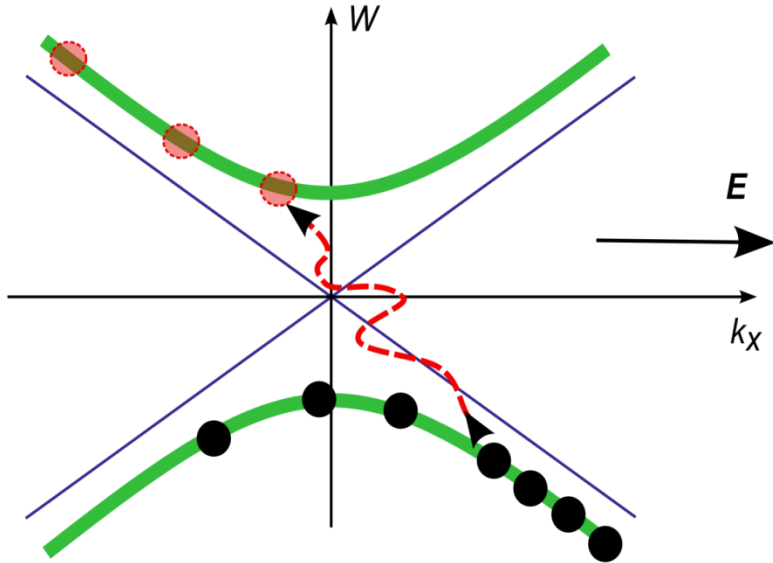
10~20 fs

~100 fs
~300-500 fs

3-10 ps =
3000-10 000 fs

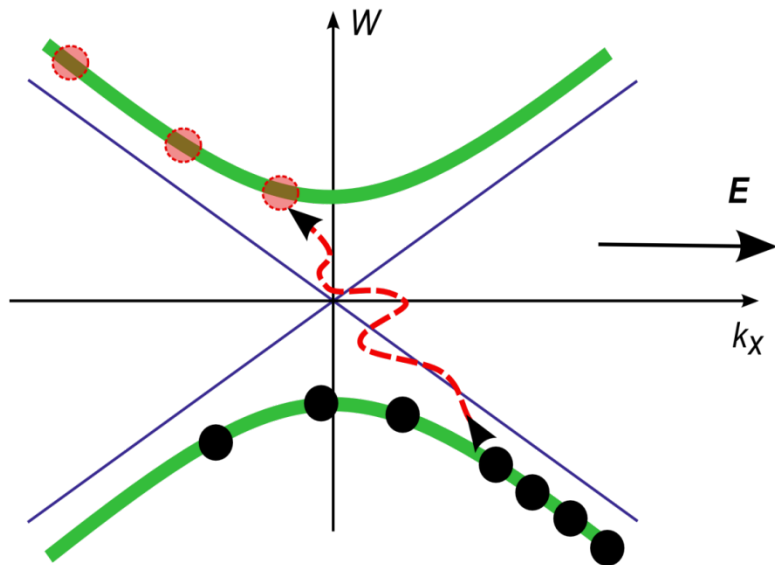


Аналог переходов Ландау-Зинера



$$\hbar \dot{k}_x = -eE$$

Аналог переходов Ландау-Зинера

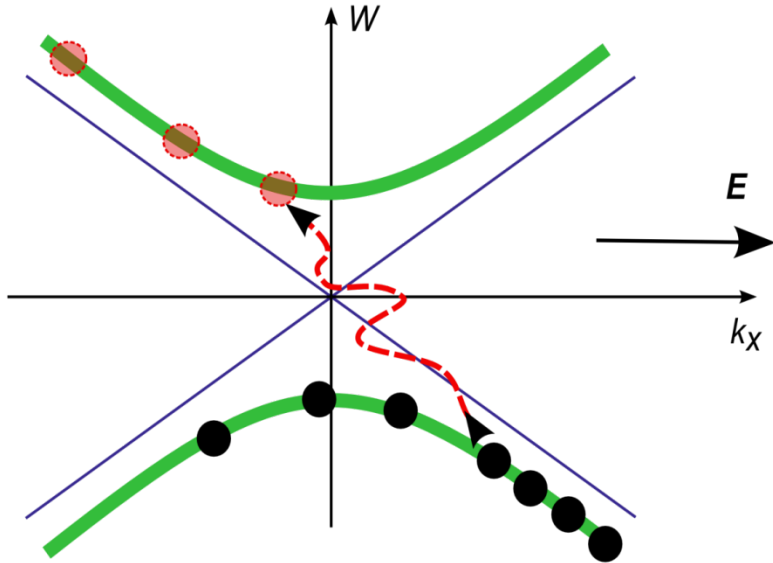


$$\hbar \dot{k}_x = -eE$$

$$P_{LZ} = \exp(-2\pi\Gamma)$$

$$\Gamma = \hbar^{-1} (\Delta W_{min}/2)^2 |\partial(W_+ - W_-)/\partial t|^{-1}$$

Аналог переходов Ландау-Зинера



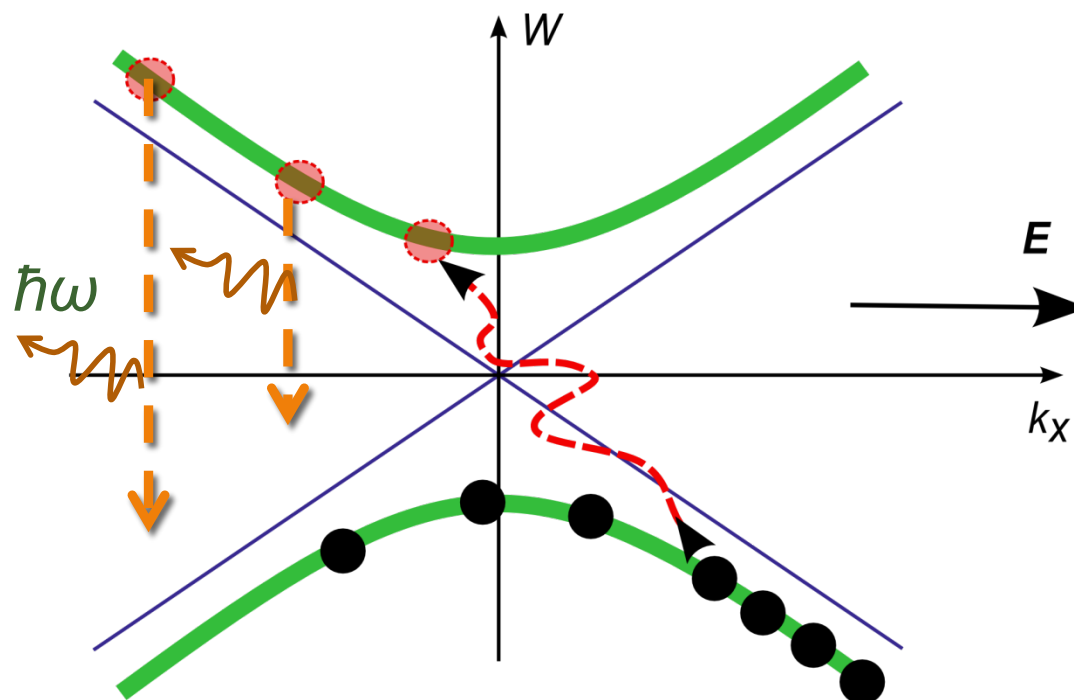
$$\hbar \dot{k}_x = -eE$$

$$P_{LZ} = \exp(-2\pi\Gamma)$$

$$\Gamma = \hbar^{-1} (\Delta W_{min}/2)^2 |\partial(W_+ - W_-)/\partial t|^{-1}$$

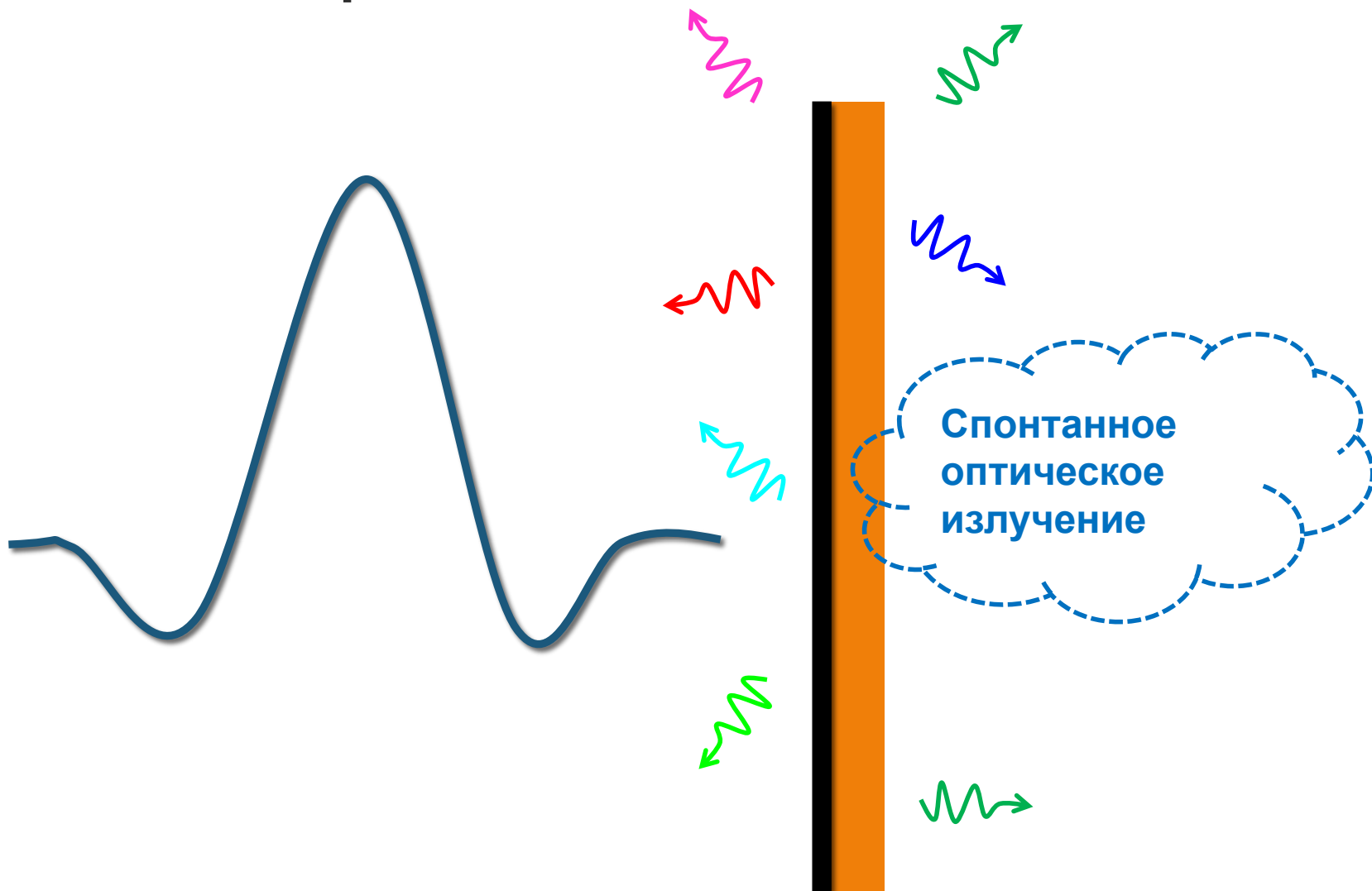
➔
$$P_{LZ} = \exp\left(-\pi \hbar v_F k_y^2 / |eE|\right)$$

Идея эксперимента

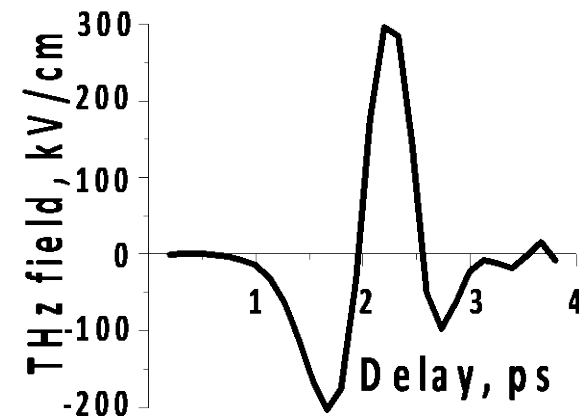
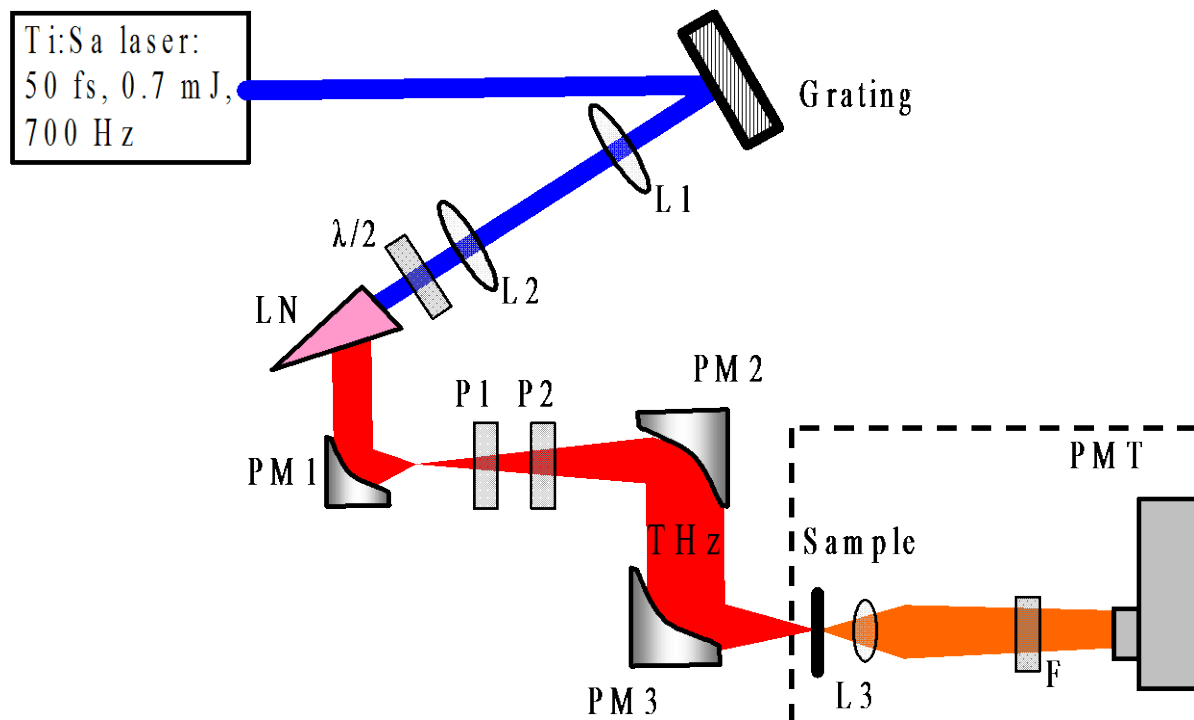


Индукцированная ТГц импульсом
инверсия \Rightarrow спонтанная эмиссия

Идея эксперимента



Экспериментальная установка



Диапазон детектирования: от 350 нм до 600 нм

Спонтанная оптическая эмиссия

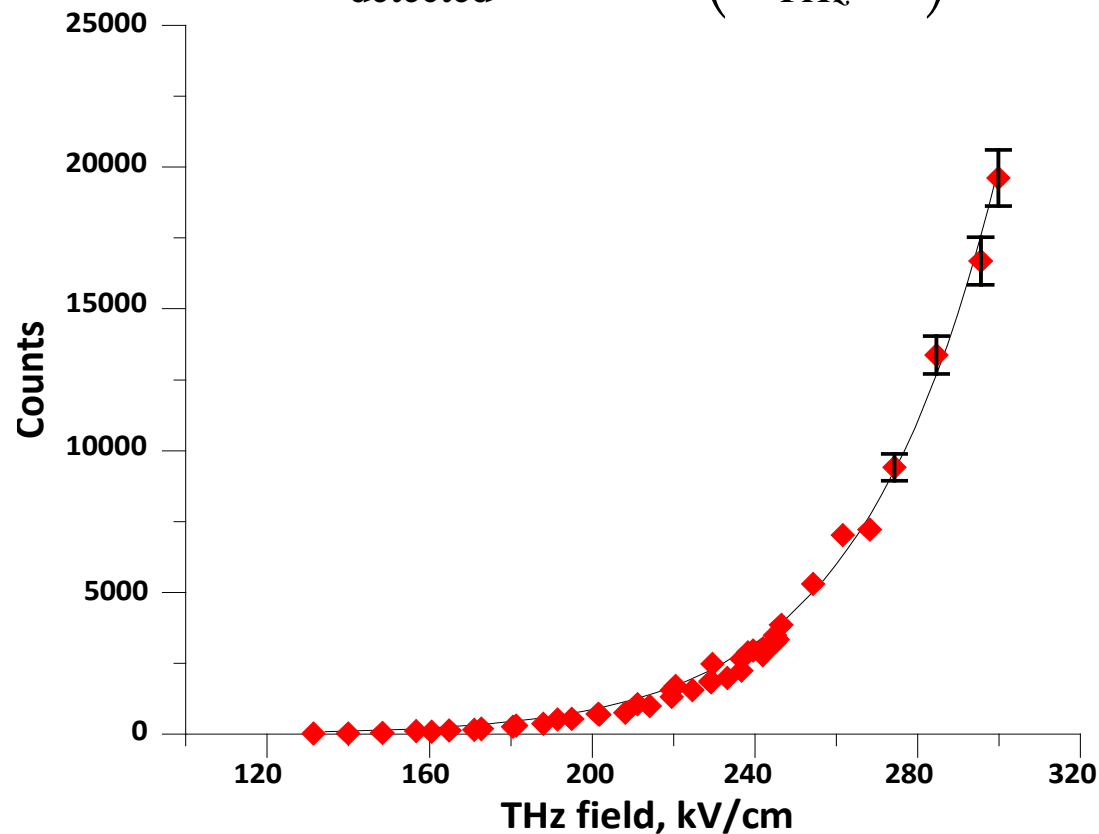
- Наблюдались фотоны с энергией до 3.5 эВ
- Диаграмма направленности – почти сферическая

* Фотоны частично поляризованы

– вероятно, потому что функция распределения сохраняет анизотропию

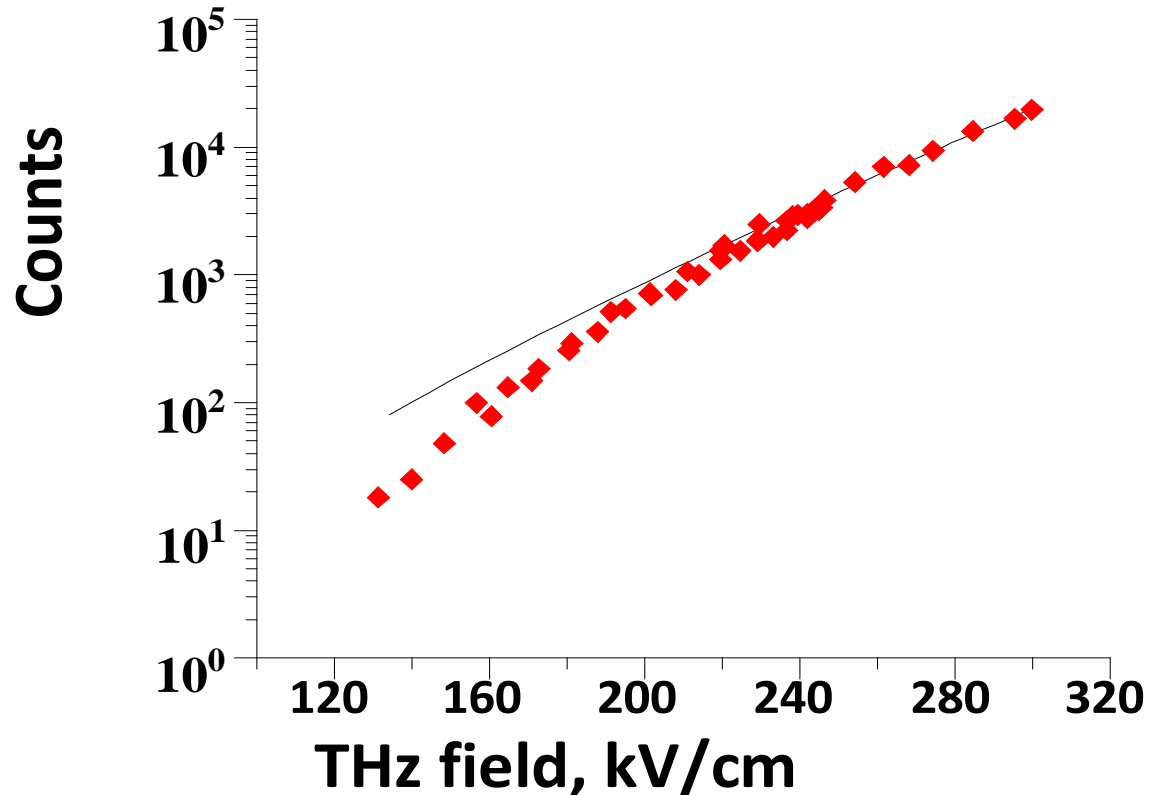
Спонтанная оптическая эмиссия

$$N_{\text{detected}} \propto \exp\left(E_{\text{THz}}^{3/4}\right)$$

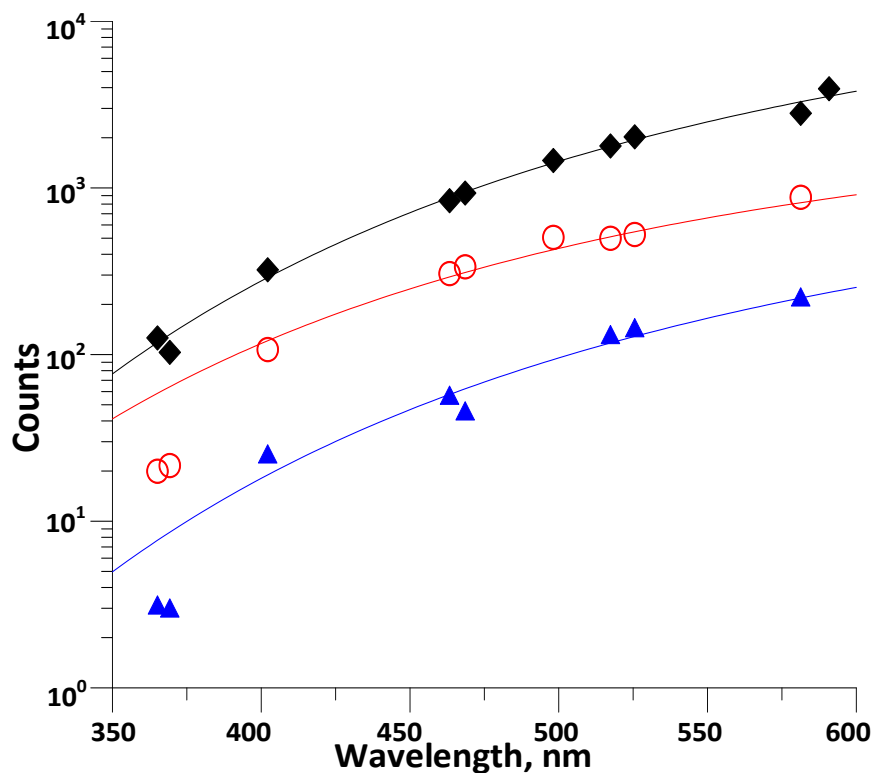


Спонтанная оптическая эмиссия

$$N_{\text{detected}} \propto \exp\left(E_{\text{THz}}^{3/4}\right)$$



Спонтанная оптическая эмиссия: спектр



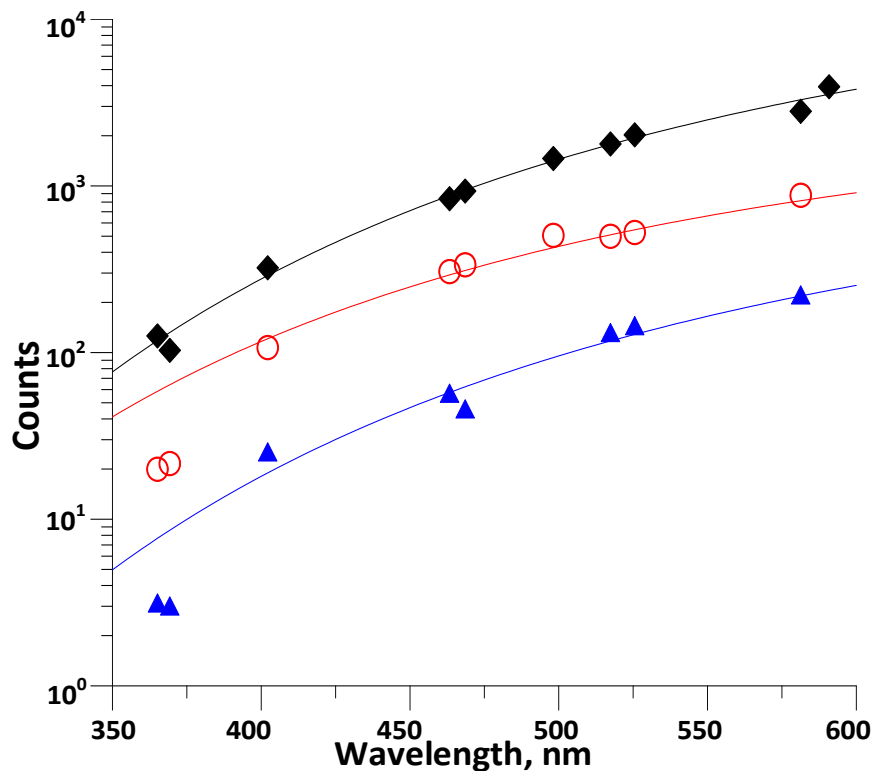
Black: $E_{\text{THz}} = 300 \text{ kV/cm}$, $T = 0.25 \text{ eV}$

Red: $E_{\text{THz}} = 250 \text{ kV/cm}$, $T = 0.28 \text{ eV}$

Blue: $E_{\text{THz}} = 206 \text{ kV/cm}$, $T = 0.25 \text{ eV}$

$$P_0(\omega, T) \propto \omega^2 \exp(-\hbar\omega/T)$$

Спонтанная оптическая эмиссия: спектр



Black: $E_{\text{THz}} = 300 \text{ kV/cm}$, $T = 0.25 \text{ eV}$

Red: $E_{\text{THz}} = 250 \text{ kV/cm}$, $T = 0.28 \text{ eV}$

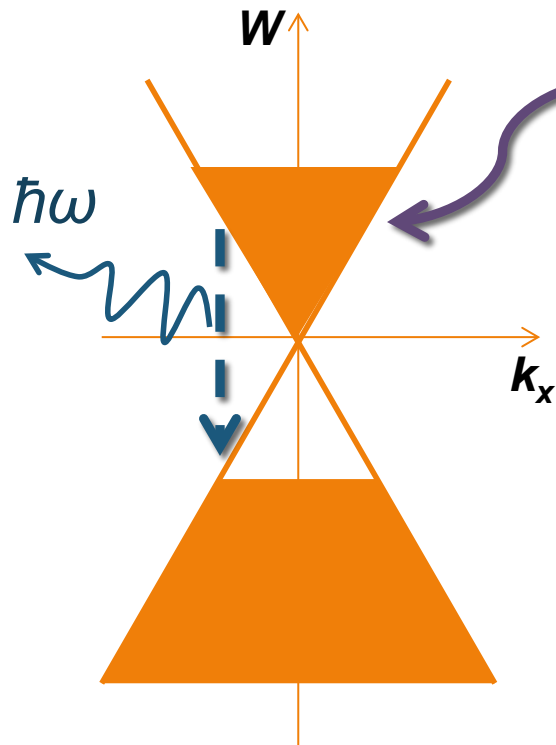
Blue: $E_{\text{THz}} = 206 \text{ kV/cm}$, $T = 0.25 \text{ eV}$

Это не просто «тепловое»
излучение серого тела

↓
Действие ТГц – это не
просто нагрев

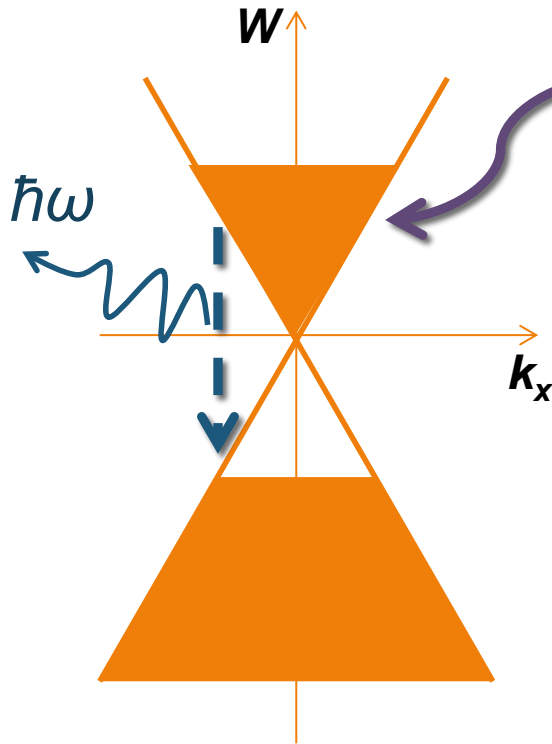
$$P_0(\omega, T) \propto \omega^2 \exp(-\hbar\omega/T)$$

Модель функции распределения



$$N_{LZ-electrons} \approx \pi^{-2} v_F^{-1/2} \left| \hbar^{-1} e E_{THz} \right|^{3/2} \Delta t_{\text{eff}}$$

Модель функции распределения



$$N_{LZ-electrons} \approx \pi^{-2} v_F^{-1/2} \left| \hbar^{-1} e E_{THz} \right|^{3/2} \Delta t_{\text{eff}}$$

**Спонтанная эмиссия такой системы
даёт хорошую интерпретацию
эксперимента**

$$N_{\text{detected}} \propto \exp\left(E_{THz}^{3/4}\right)$$

I.V. Oladyshkin, S.B. Bodrov, Yu.A. Sergeev, A.I.Korytin, M.D Tokman, A.N. Stepanov. Optical emission of graphene and electron-hole pair production induced by a strong terahertz field // Phys. Rev. B **96**, 155401 (2017)

Заключение

- Была впервые зарегистрирована спонтанная оптическая эмиссия графена под действием сильного ТГц поля
- Модель, включающая переходы Ландау-Зинера и би-Фермиевское распределение, позволяет количественно интерпретировать эксперимент

Планы / вопросы

- Возможно ли наблюдать частично когерентное излучение?
 - нужны более низкие температуры
- Изменится ли что-то в сильном магнитном поле?
- Какие данные о самом графене можно извлечь из этих результатов?

Спасибо за внимание!

Density matrix equations

$$\hat{H} = v_F \hat{\sigma} (\hat{\mathbf{p}} + e\mathbf{A}/c) - e\phi$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - \frac{e}{\hbar} E(t) \cdot \frac{\partial}{\partial k_x} \right) \cdot \rho_k + i\omega_k \rho_k = -i \frac{\Omega_k(t)}{2} \Delta_k$$

$$\Omega_k(t) = \frac{\sin \theta_k e E(t)}{k\hbar}$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - \frac{e}{\hbar} E(t) \cdot \frac{\partial}{\partial k_x} \right) \cdot \Delta_k = -i\Omega_k(t) \cdot (\rho_k - \rho_k^*)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - \frac{e}{\hbar} E(t) \cdot \frac{\partial}{\partial k_x} \right) \cdot n_{\Sigma k} = 0$$

Density matrix equations: SHG

$$\rho_{\omega\mathbf{k}}(t) \approx -\frac{i}{4} e^{i\frac{(\omega-\omega_{\mathbf{k}})^2}{4\cos\theta_{\mathbf{k}}\frac{ev_F E_0}{\hbar}} - \gamma\frac{\omega-\omega_{\mathbf{k}}}{2\cos\theta_{\mathbf{k}}\frac{ev_F E_0}{\hbar}}} \Omega_{\omega\mathbf{k}}(t_s, t) \Delta_{0\mathbf{k}}(t_s, t) \times$$

$$\times \left(e^{\mp i\pi/4} \sqrt{\frac{\pi}{\left| \cos\theta_{\mathbf{k}} \frac{ev_F E_0}{\hbar} \right|}} + \int_0^{\left(\frac{\omega-\omega_{\mathbf{k}}}{2\cos\theta_{\mathbf{k}}\frac{v_F e E_0}{\hbar}} \right)} e^{-i\cos\theta_{\mathbf{k}}\frac{ev_F E_0}{\hbar}x^2} dx \right)$$

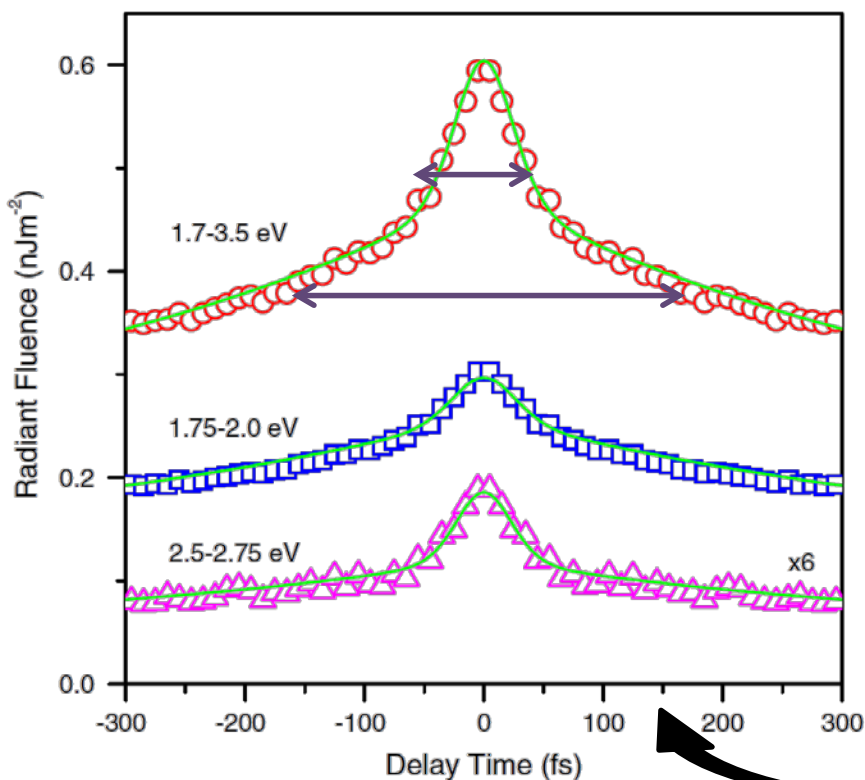
Другие эксперименты: фотолюминесценция

PRL 105, 127404 (2010)

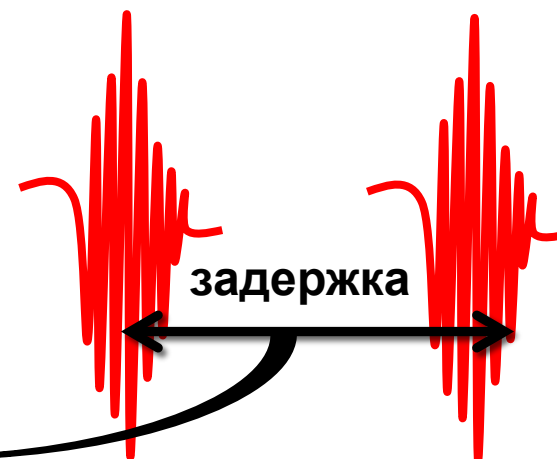
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
17 SEPTEMBER 2010

Ultrafast Photoluminescence from Graphene

Chun Hung Lui (呂振鴻),¹ Kin Fai Mak,¹ Jie Shan,² and Tony F. Heinz^{1,*}

Люминесценция графена
после воздействия двух 30-фс
лазерных импульсов



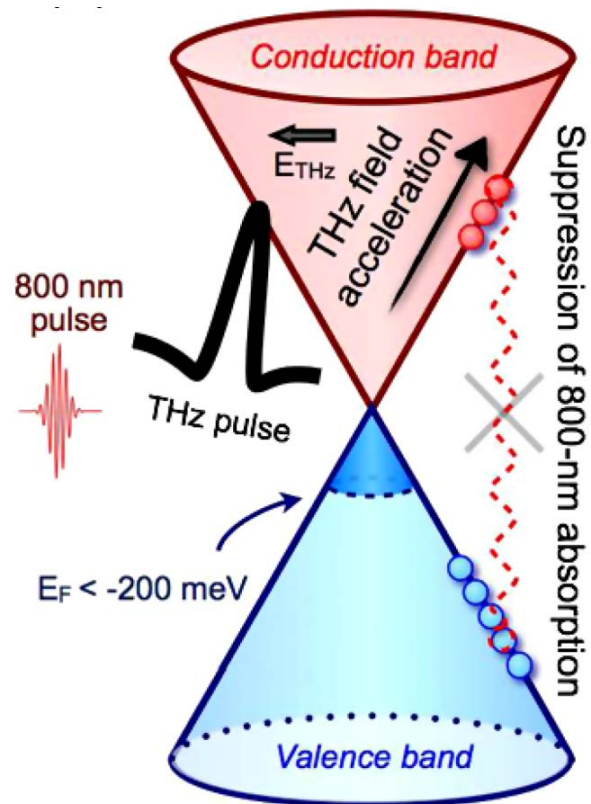
Другие эксперименты: графен в ТГц поле

PRL 109, 166603 (2012)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
19 OCTOBER 2012

Ultrafast Carrier Dynamics in Graphene under a High Electric Field

Shuntaro Tani,^{1,2,*} François Blanchard,^{2,3} and Koichiro Tanaka^{1,2,3,†}

Число электронов в зоне проводимости более чем в 10 раз превышало исходное число носителей