



Московский
государственный
университет
имени М. В. Ломоносова



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ

Докторская диссертация

**МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ ПРОИЗВОЛЬНО
ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В
ИНТЕНСИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПОЛЯХ**

Стремоухов Сергей Юрьевич
д.ф.-м.н., профессор

Развитие лазерных источников



1964

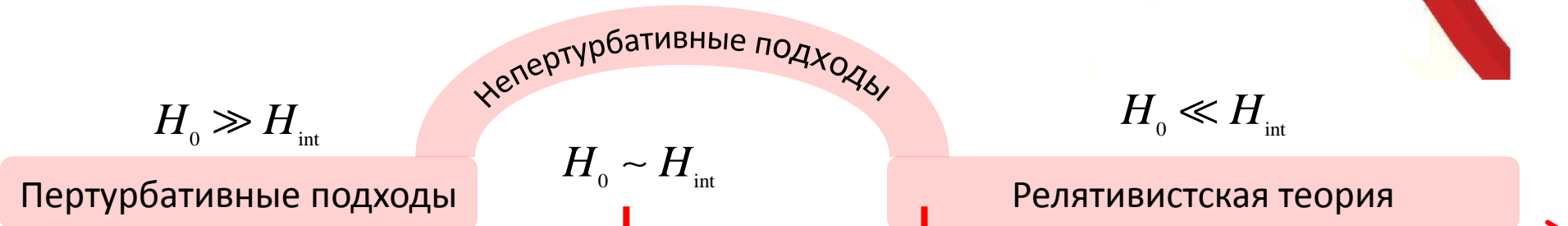
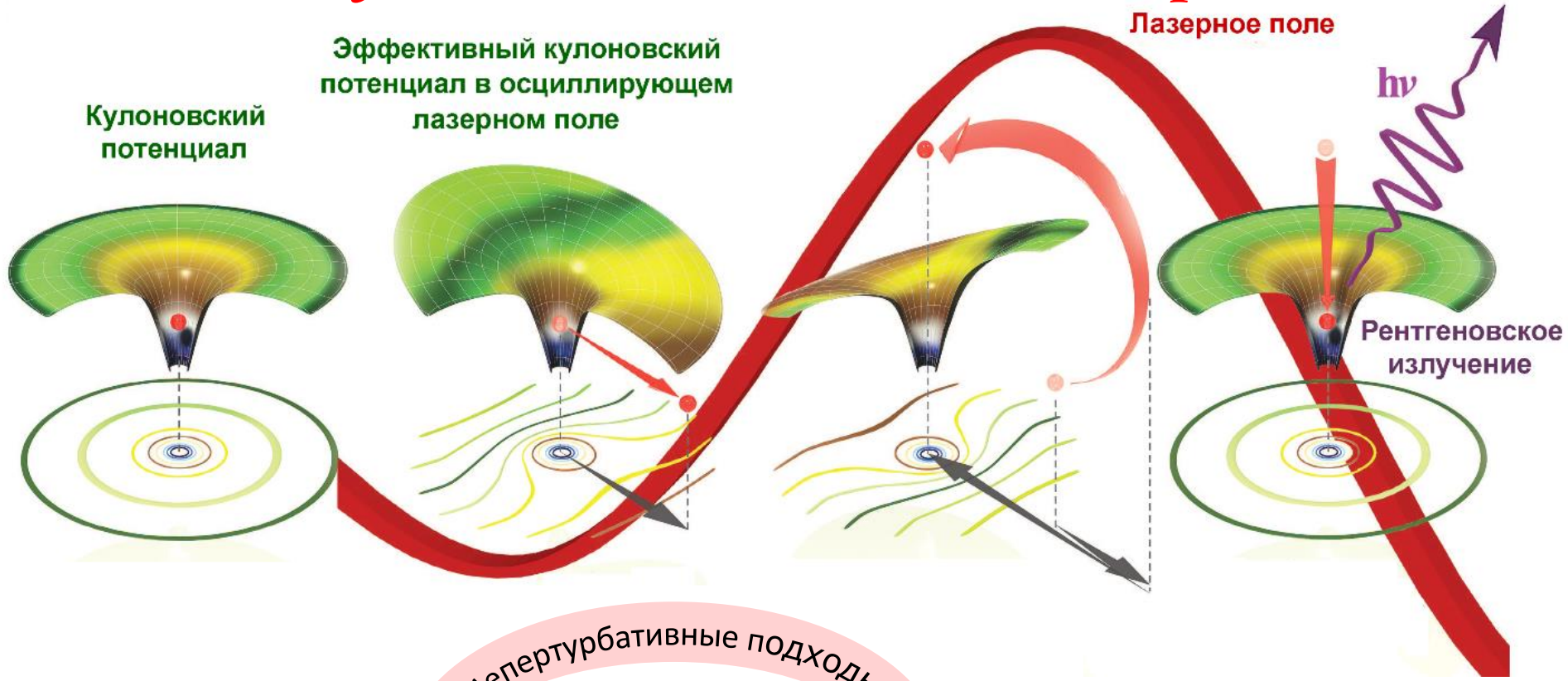
Н.Г. Басов,
А.М. Прохоров,
Ч.Х. Таунс
за фундаментальные работы в
области квантовой электроники,
которые привели к созданию
генераторов и усилителей на
лазерно-мазерном принципе

2018 2023

Ж. Муру,
Д. Стрикланд
за метод генерации
высокоинтенсивных
ультракоротких
оптических импульсов

П. Агостини,
Ф. Крауз,
А. Л'Юлье
за создание
экспериментальных
методов генерации
аттосекундных импульсов
света для исследования
динамики электронов в
веществе

Фундаментальные вызовы к теории



$$H_0 \gg H_{int}$$

Пертурбативные подходы

$$\frac{E}{E_{at}} \ll 1$$

$$H_0 \sim H_{int}$$

Малый параметр

I_{at}

?

I_{rel}

$$H_0 \ll H_{int}$$

Релятивистская теория

$$\frac{E_{at}}{E} \ll 1$$

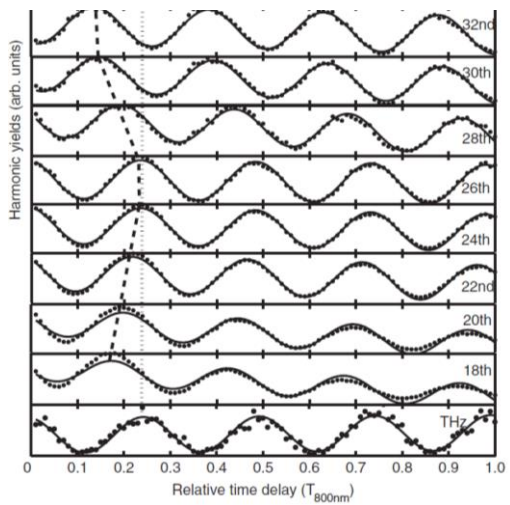
Интенсивность

Методы описания генерации когерентного излучения

Квантово-механическое описание:

- + большое количество теоретических подходов к описанию генерации гармоник высокого порядка;
- + описана природа большинства явлений, сопровождающих генерацию гармоник высокого порядка;

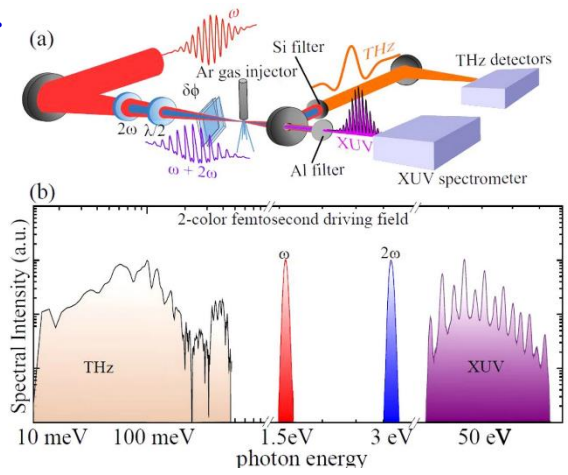
– сложности с учетом изменения параметров поля при его распространении.



Макроскопическое описание:

- + развиты теории генерации ТГц излучения;
- + описана природа большинства явлений, сопровождающих генерацию ТГц излучения;
- + возможность последовательного описания параметров лазерного поля при его распространении в среде;

– слабое влияние параметров отклика одиночного атома.

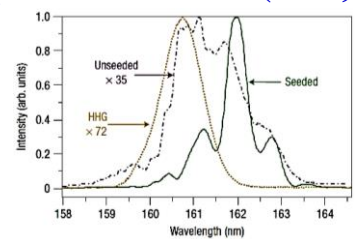


Интерференционная модель

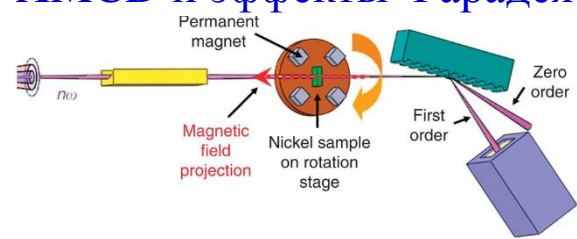
A. Gragossian et al., Scientific Reports, 6, 34973 (2016)

Применение генерируемого излучения

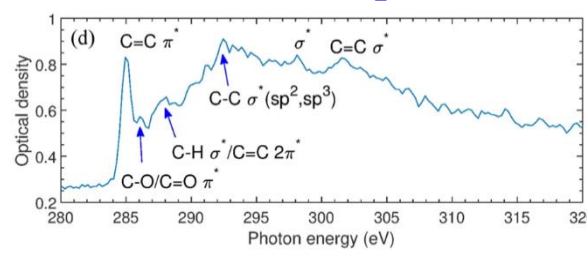
-затравка в ЛСЭ (УФ, ВУФ)



-XMCD и эффекты Фарадея

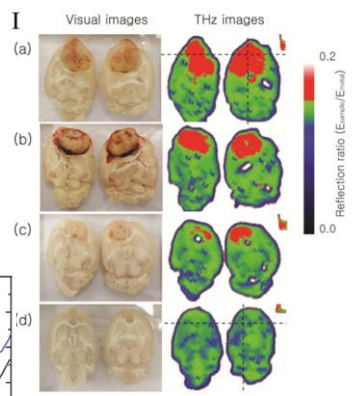


- NEXAFS измерения



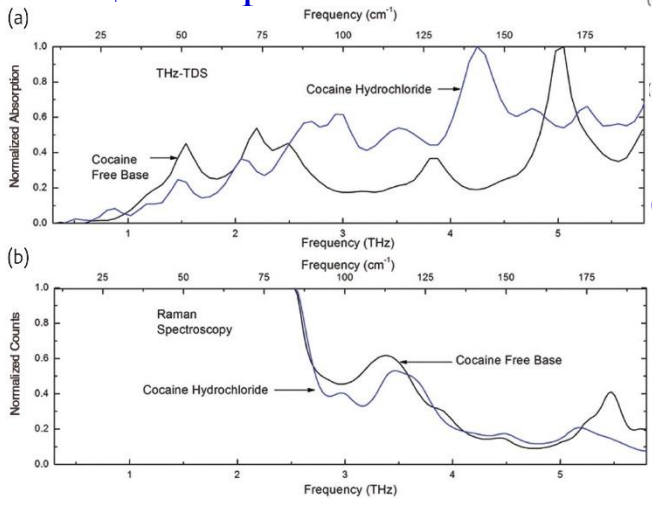
G.Lambert et al., Nat.Phys., 4, 296 (2008) G.Lambert et al., Nat.Com., 6, 6167 (2015) Y. Fu et al. Com. Phys., 3, 92 (2020)
 C.Alves et al., Phys.Rev.B, 100, 144421 (2019)

-ТГц визуализация опухолей

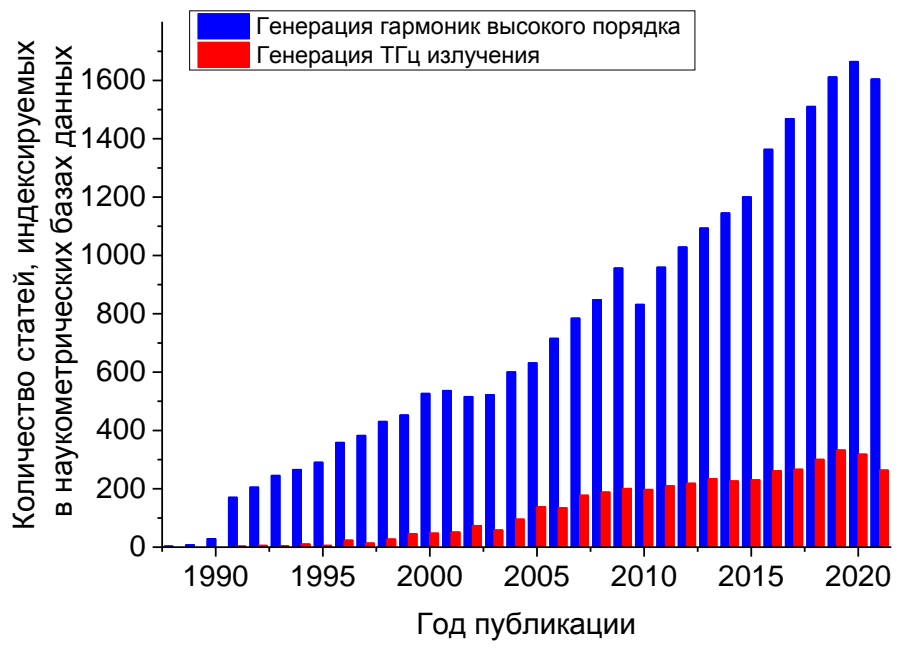


O.Cherkasova et al., Photonics,8,22 (2021)

-ТГц спектроскопия ВМС



A.G.Davies et al., Materials Today, 11(3), 18 (2008)



Основные положения теории

Уравнение Шредингера для атома, взаимодействующего с электромагнитным полем имеет вид:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left[\frac{1}{2m} \left(\vec{p} - \frac{e}{c} \vec{A}(t) \right)^2 + U \right] \psi$$

Краевая задача свободного атома:

$$\left(\frac{\vec{p}^2}{2m} + U(\vec{r}) \right) u_n(\vec{r}) = E_n u_n(\vec{r})$$

Краевая задача «об атоме в поле»:

$$\left[\frac{1}{2m} \left(\vec{p} - \frac{q}{c} \vec{A}(t) \right)^2 + U(r) \right] \varphi_N(\vec{r}, t) = E_N \varphi_N(\vec{r}, t)$$

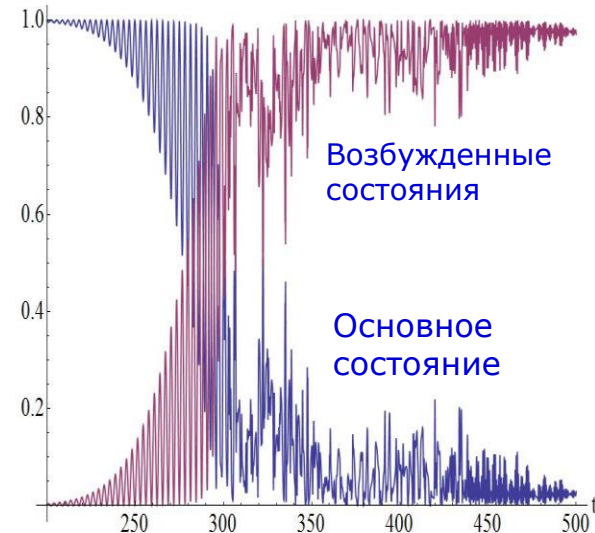
Точное решение краевой задачи «об атоме в поле» имеет вид:

$$u_n(\vec{r}), E_n$$

$$\varphi_N(\vec{r}, t) = u_n(\vec{r}) \hat{V}^{-1}, \quad \hat{V} = \exp\left(-i \frac{q}{\hbar c} \vec{A}(t) \vec{r}\right),$$

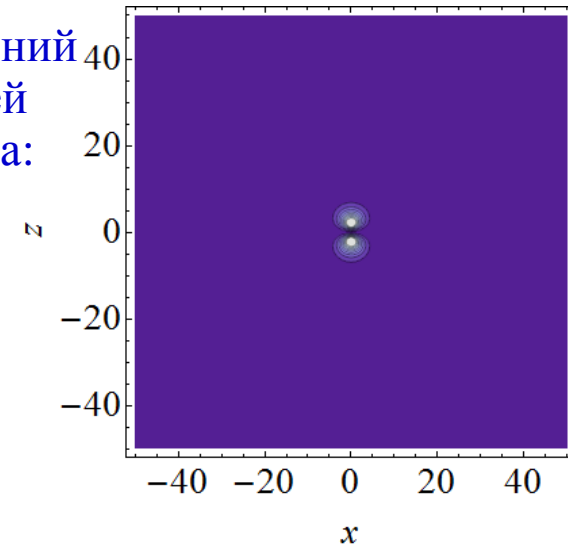
$$E_N = E_n$$

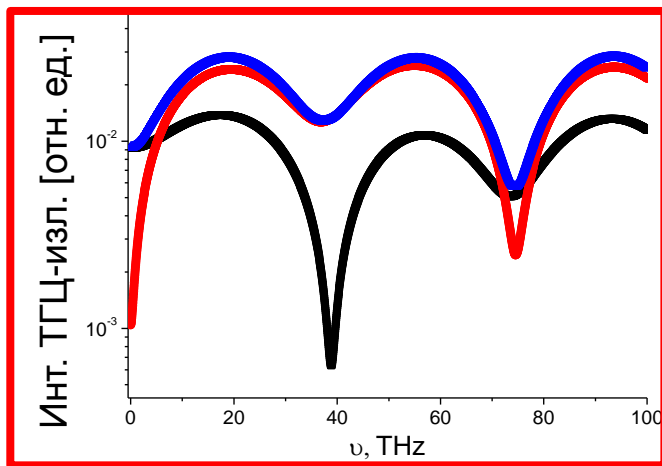
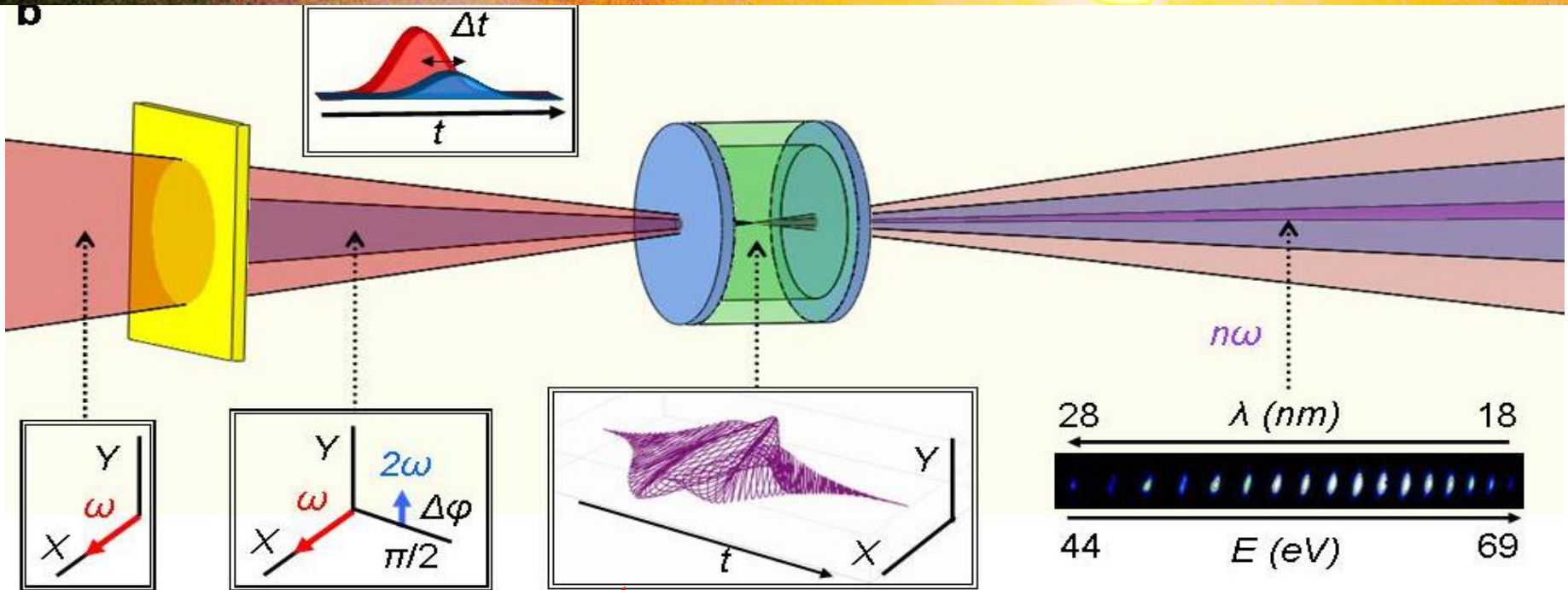
Вер-ть



Система дифференциальных уравнений для амплитуд населенностей уровней непрерывного и дискретного спектра:

$$i\hbar \frac{da_n}{dt} = \sum_{m,k} V_{nk}^{-1} E_k V_{km} a_m.$$



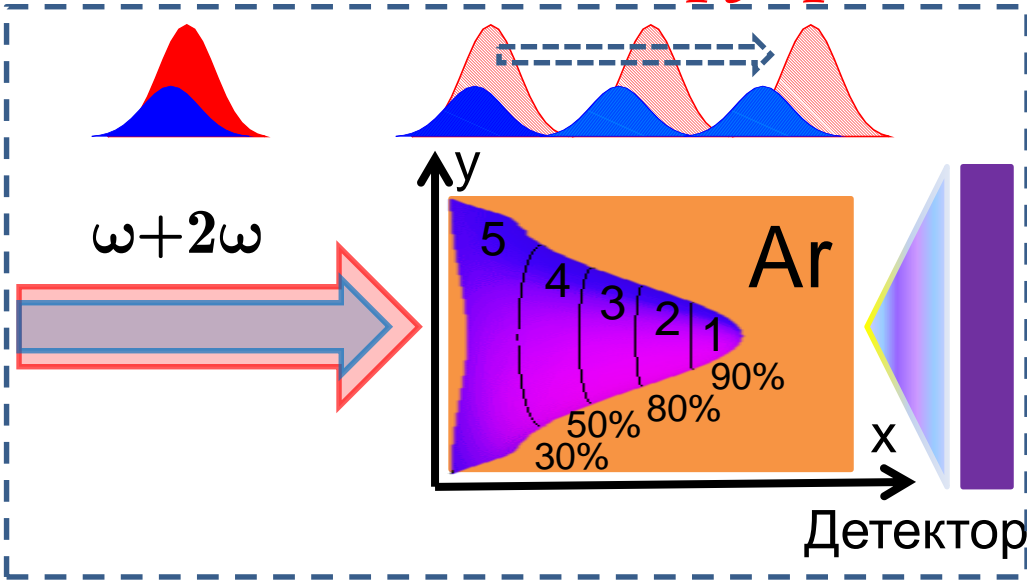


Генерация ТГц излучения

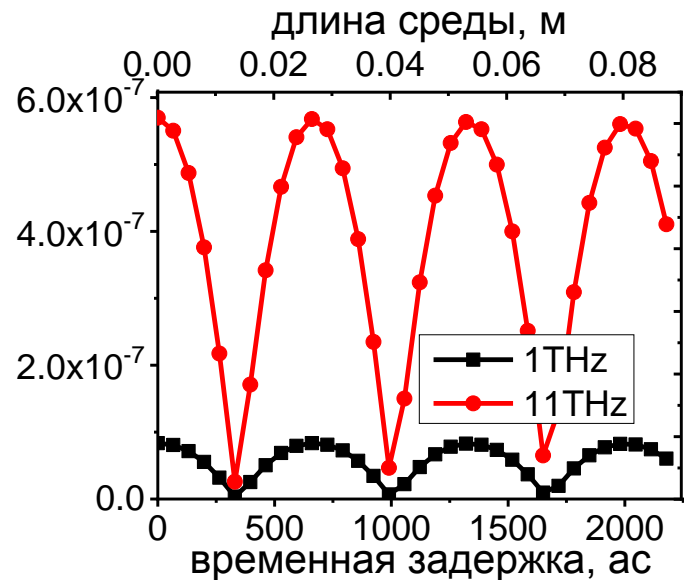
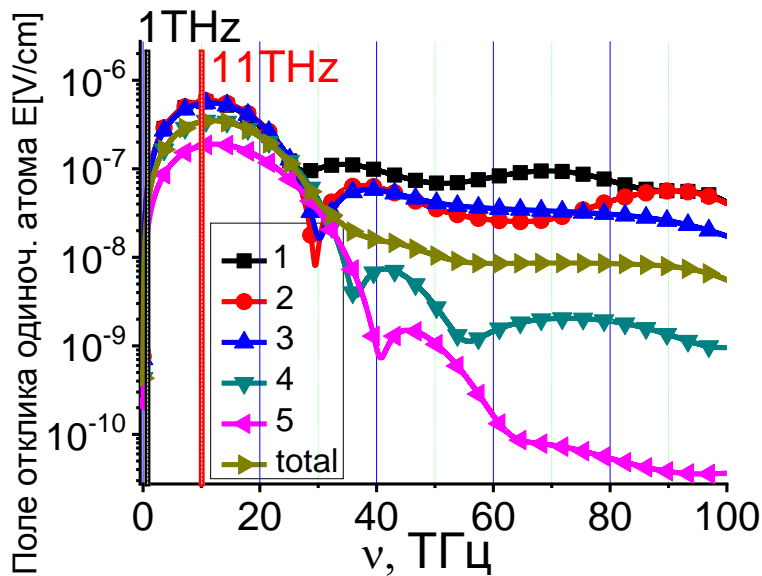


Генерация гармоник

Интерференционная модель



$$\vec{E}(\vec{r}, \omega) = -\frac{i\omega}{c^2} \sum_i \left[\vec{n}_i \left[\vec{n}_i \vec{J}_i(\omega) \right] \right] \frac{1}{|\vec{R}_i|} e^{i\frac{\omega}{c} |\vec{R}_i|},$$

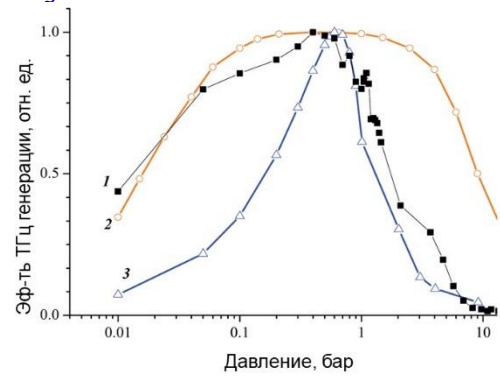


Ar

Экспериментально ориентированные исследования

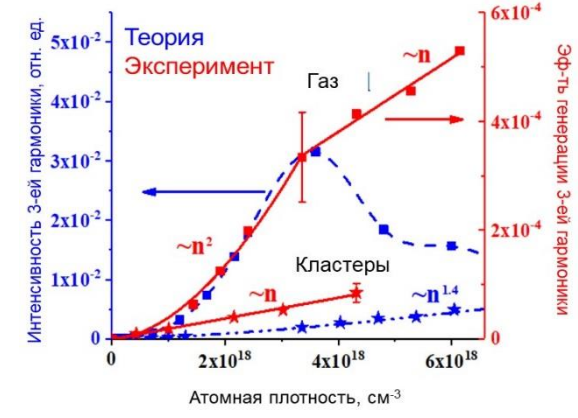
✓ Генерация ТГц излучения в газах

(совместно с гр. чл.корр. РАН А.П. Шкуринова)



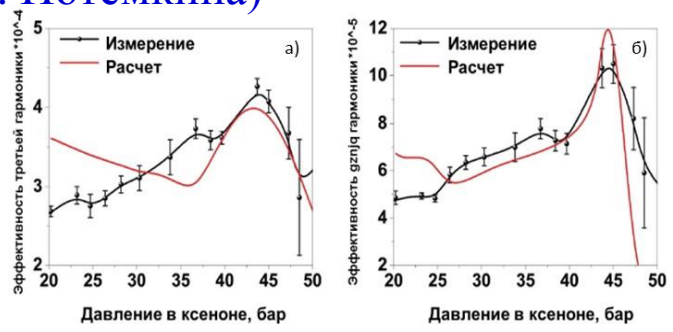
✓ Генерация гармоник в кластерных средах

(совместно с группой проф. В.М. Гордиенко)

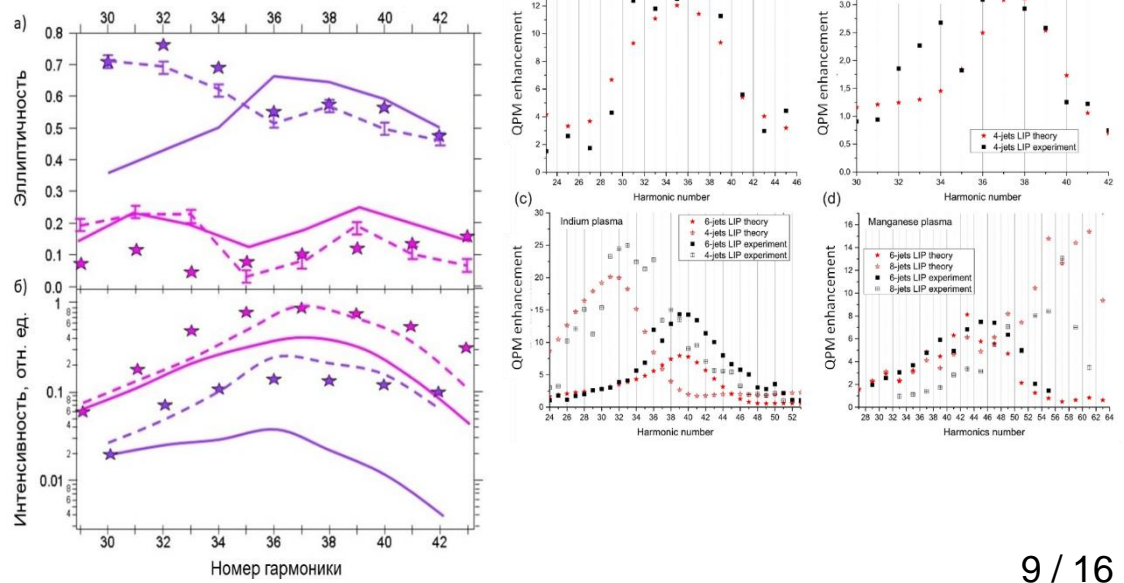


✓ Генерация оптических гармоник в газах

(совместно с группой доц. Ф.В. Потемкина)



✓ Генерация гармоник высокого порядка в плазме (совместно с группой проф. Р.А. Ганеева)

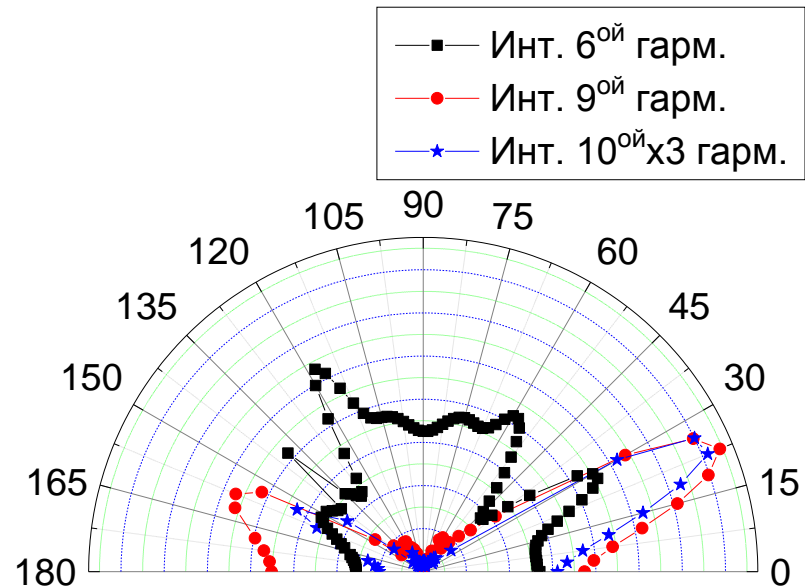
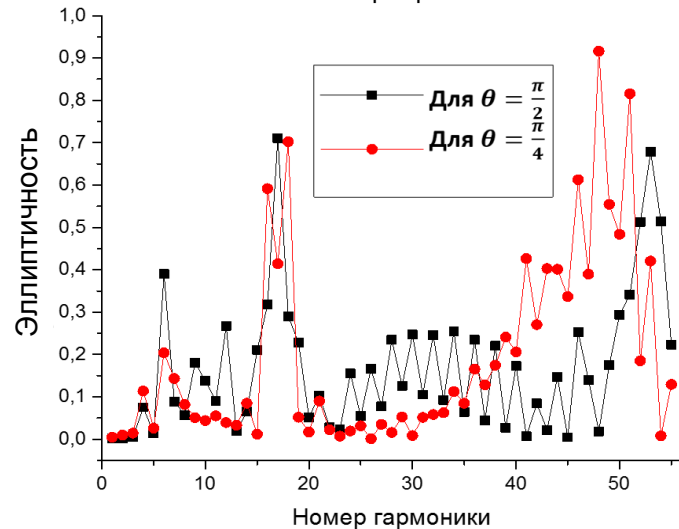
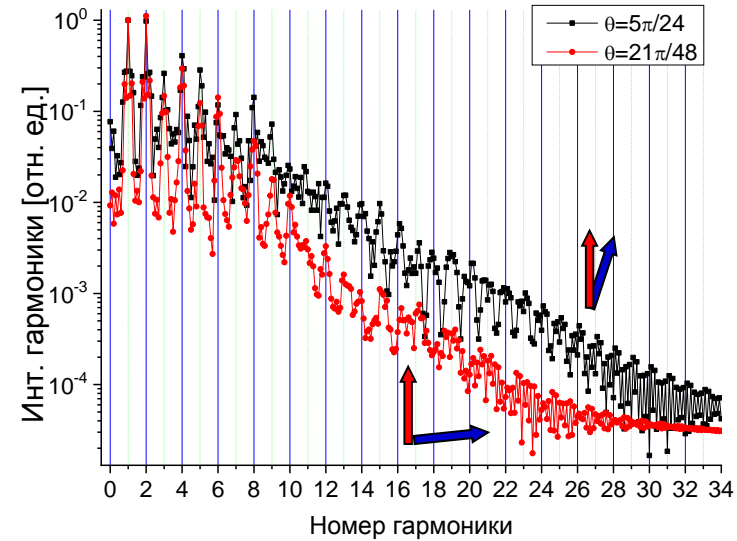


✓ Генерация эллиптически поляризованных гармоник высокого порядка (совместно с группой G. Lambert, V. Malka, Палезо, Франция).

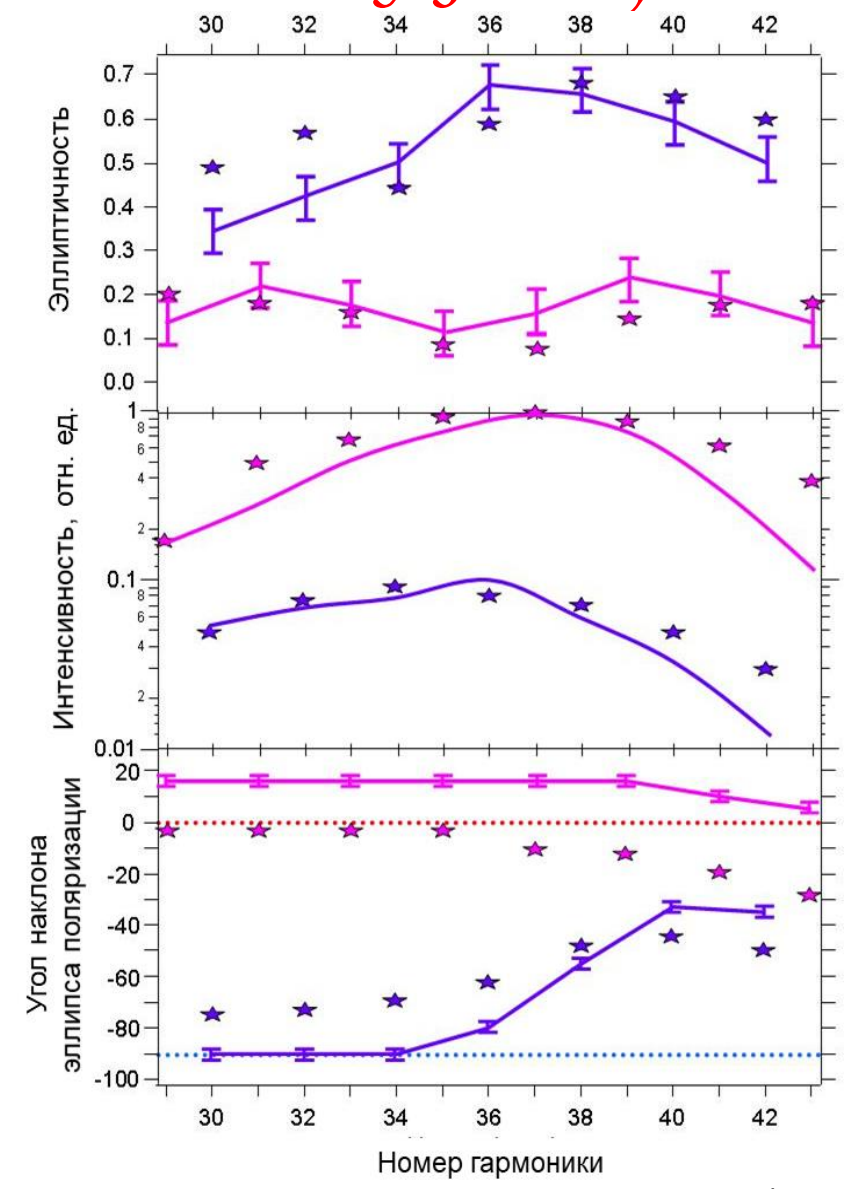
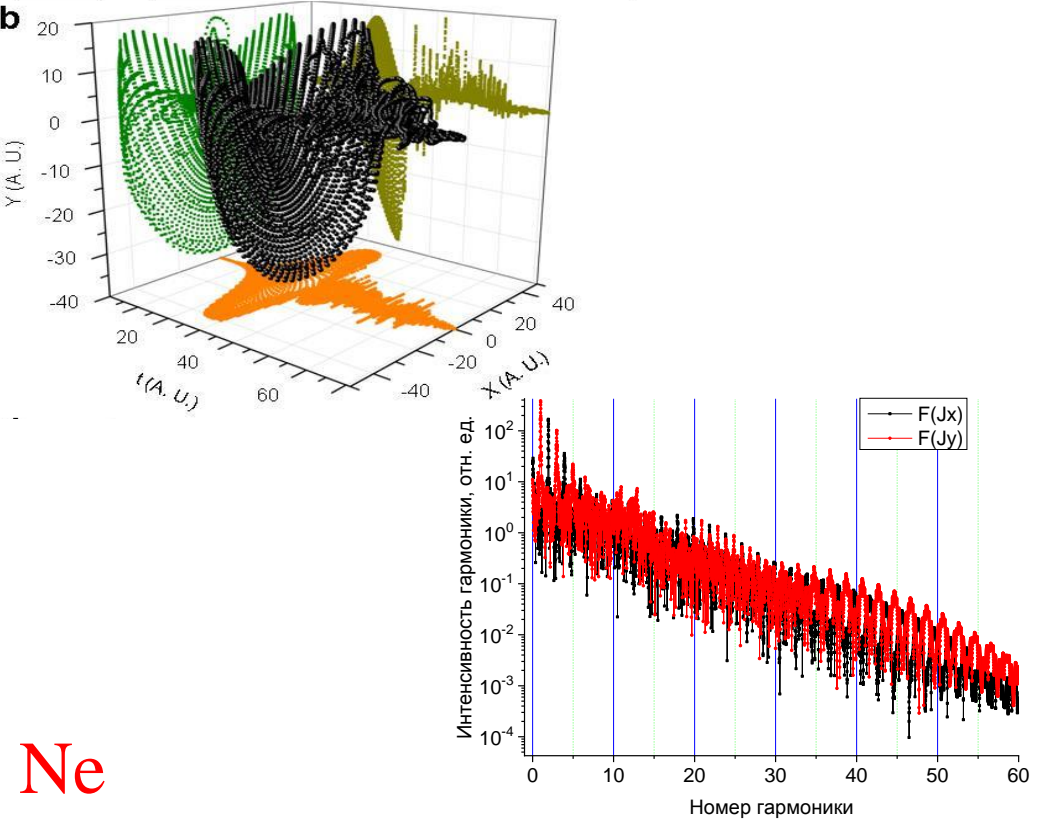
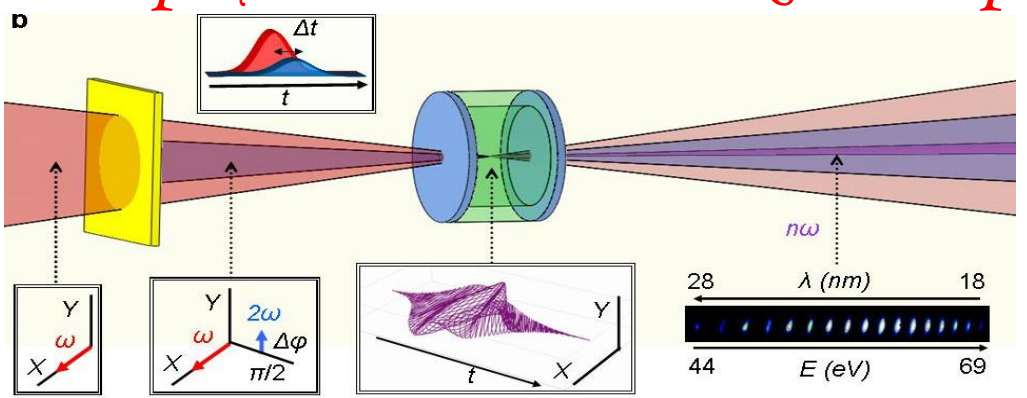
Вариация угла между поляризациями ω и 2ω

Ar

$$I_{01} = I_{02} = 6.77 \cdot 10^{12} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}, \quad \tau_1 = \tau_2 = 26.6 \text{ фс}, \quad t_{02} - t_{01} = 0$$

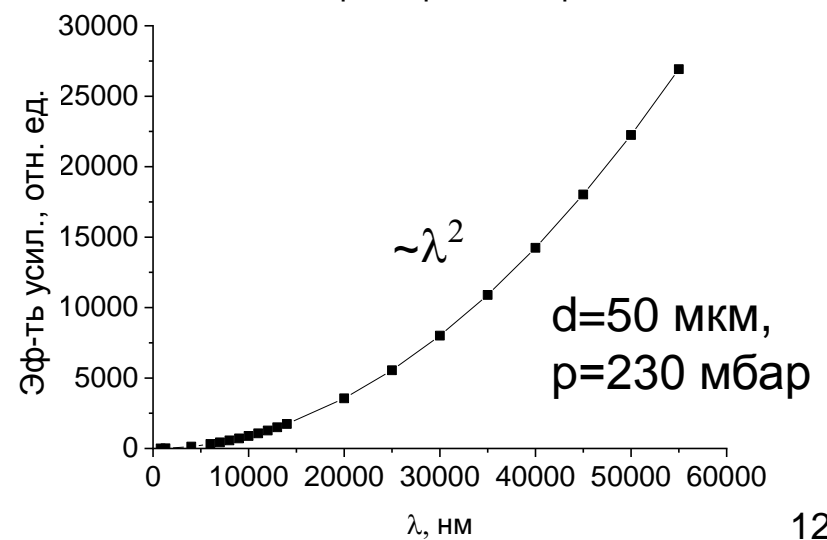
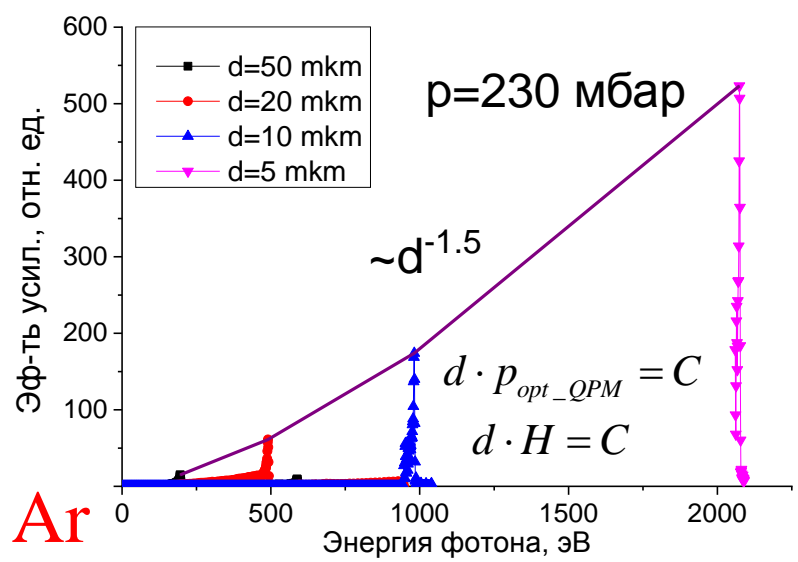
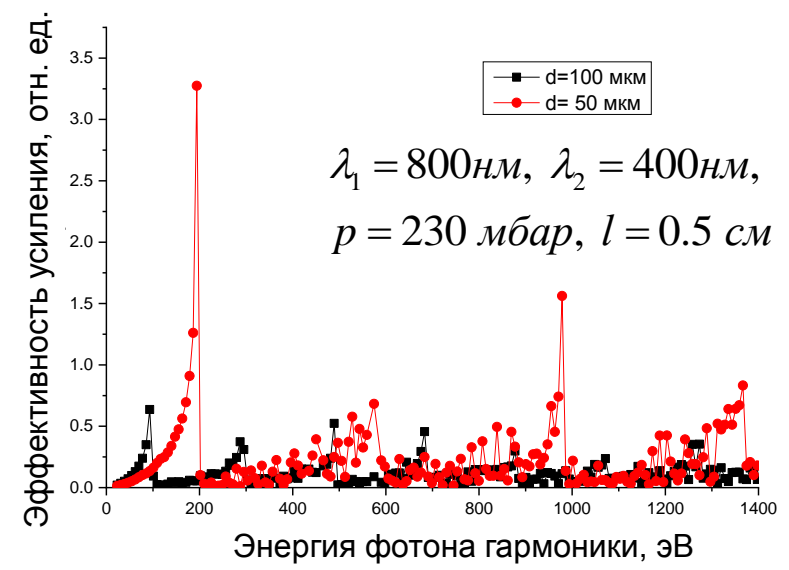
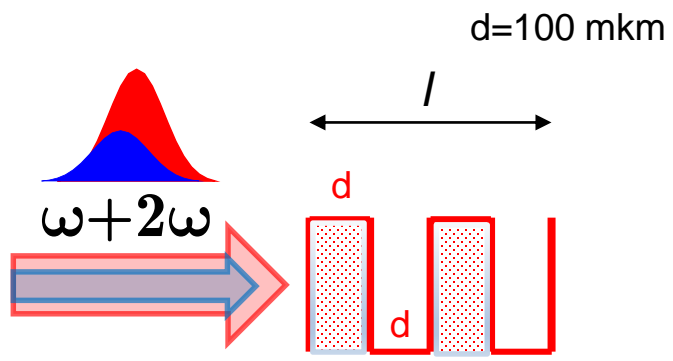


Генерация эллиптически поляризованного ВУФ излучения



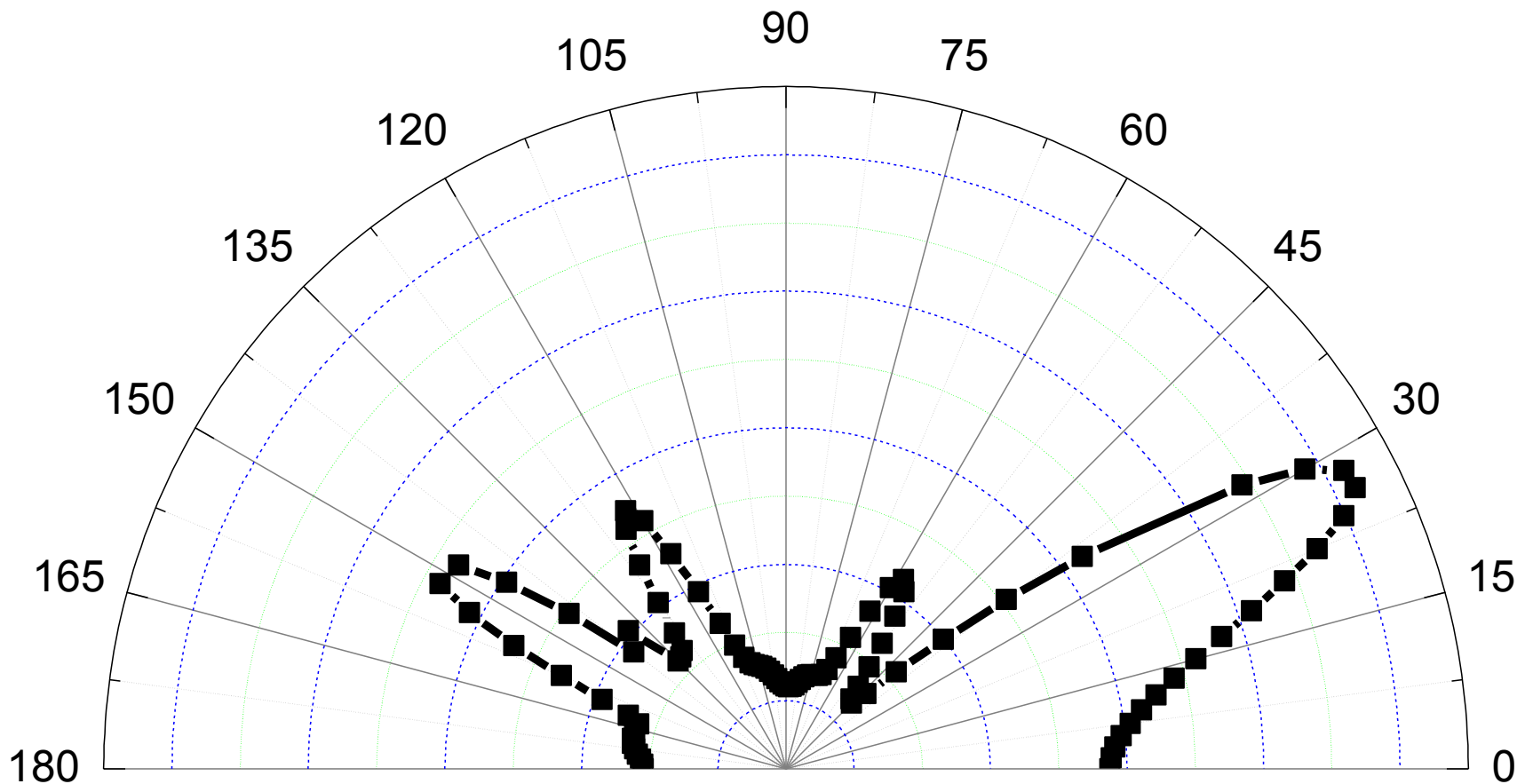
Ne

Эффекты квази-фазового согласования

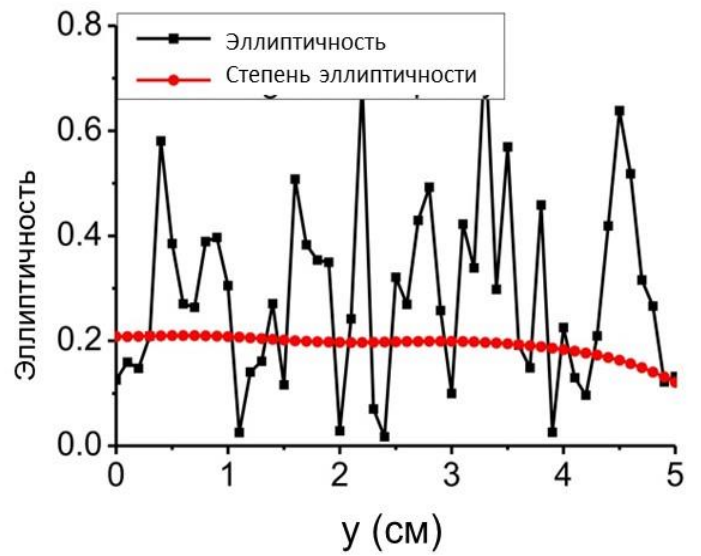
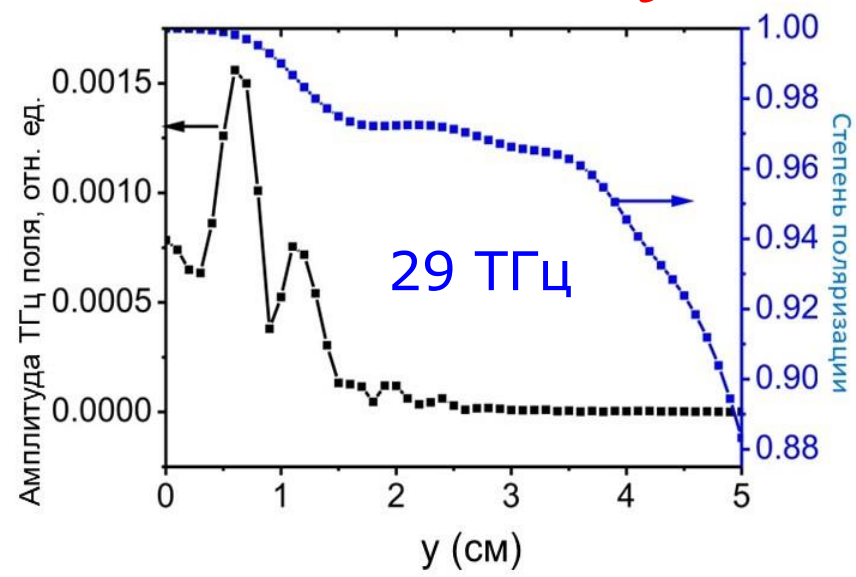
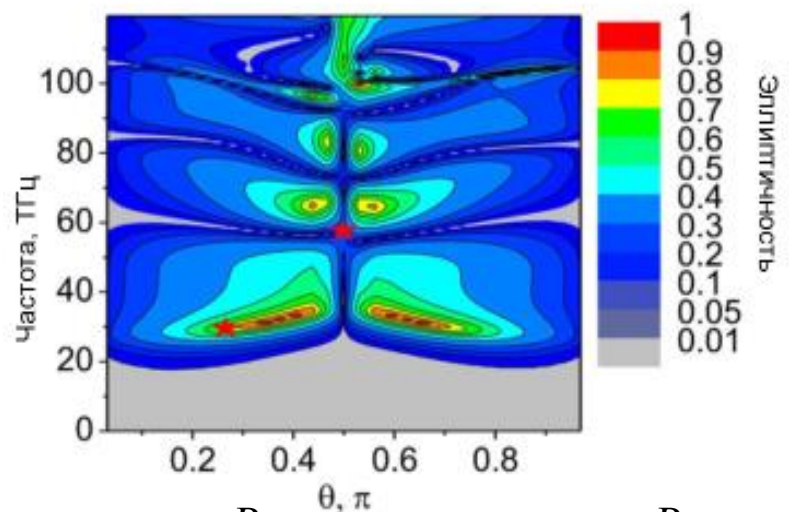
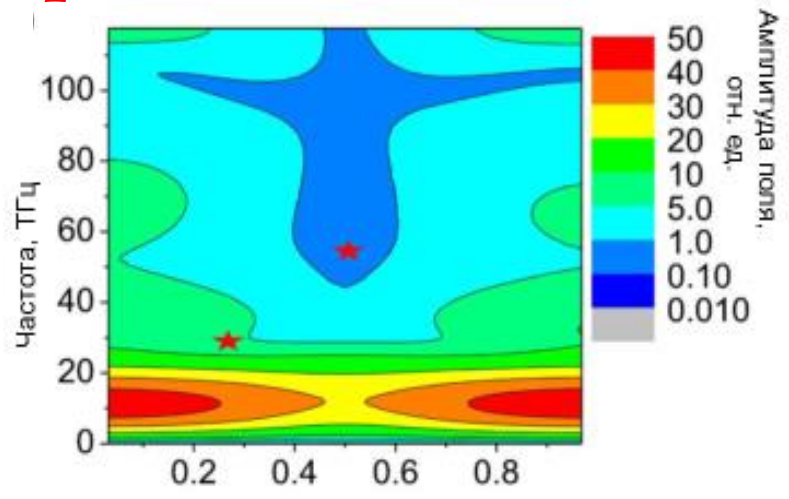


Эффективность генерации ПТГ излучения

$$I_{01} = 6.77 \cdot 10^{12} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}, \quad I_{02} = 2.7 \cdot 10^{13} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}, \quad \tau_1 = \tau_2 = 26.6 \text{ фс}, \quad t_{02} - t_{01} = 0$$



Генерация эллиптически поляризованного ТГц излучения



$$I_{01} = 6.77 \cdot 10^{12} \frac{Bm}{cm^2}, \quad I_{02} = 5.85 \cdot 10^{11} \frac{Bm}{cm^2},$$

Ar

$$\tau_1 = \tau_2 = 30\phi c, \quad t_{02} - t_{01} = 0$$

$$l = 3 \text{ см}, \quad \sigma = 0.1 \text{ см}, \quad x_0 = 40 \text{ см} \quad 14 / 16$$

Основные результаты работы

1. Разработан уникальный теоретически подход к описанию отклика одиночного атома на воздействие интенсивного лазерного поля.
2. Предложена и разработана интерференционная модель отклика протяженных газовых сред, взаимодействующих с интенсивными лазерными полями.
3. Апробированная в рамках теоретико-экспериментальных исследований теория была применена к исследованию механизмов генерации длинноволнового (терагерцового) и коротковолнового когерентного излучения. Предложен ряд методов повышения эффективности генерации излучения и управления его поляризационными свойствами.
4. Полученные результаты закладывают теоретический базис создания компактного мультиспектрального источника, который подходит для:
 - создания литографических устройств нового поколения;
 - сверхбыстрой передачи информации;
 - неинвазивной визуализации биологических, фармацевтических и композитных материалов в режиме реального времени (визуализация опухолей, уточнение природы заболевания, контроль состава лекарств и новых материалов) и др.

Нет ничего практичнее хорошей теории

Г. Р. Кирхгоф

Спасибо за внимание!