

# Современная атомная физика

проф. Попов Александр Михайлович

Нобелевские Премии по физике  
2018, 2023



# Нобелевская премия

Альфред Нобель (1833-1896) – шведский инженер и изобретатель. Самое известное изобретение - динамит «Торговец смертью» и Премия за достижения, «принесшие наибольшую пользу человечеству».

- Физика (присуждается с 1901 года в Швеции);
- Химия (присуждается с 1901 года в Швеции);
- Физиология или медицина (присуждается с 1901 года в Швеции);
- Литература (присуждается с 1901 года в Швеции);
- Содействие установлению мира во всём мире (присуждается с 1901 года в Норвегии).
- Экономика (с 1969 г.)

# Премии по физике

Х.Лоренц, П.Зееман (1902), Ф.Ленард (1905), Дж.Дж.Томсон (1906), В.Вин (1911), М.Планк (1918), А.Эйнштейн (1921), Н.Бор (1922), Дж.Франк - Г.Герц (1925), А.Комптон (1927), Л.де Бройль (1929), В.Гейзенберг (1932), Э.Шредингер, П.Дирак (1933), Девиссон (1937), О.Штерн (1943), В.Паули (1945), Х.Юкава (1949), М.Борн (1954), У.Лэмб (1945), Дж.Бардин - Л.Купер – Дж.Шриффер (1972), П.Капица (1978), Р.Вильсон-А.Пензиас (1978), Г.Биннинг-Г.Рорер (1986), Т.Хэнш (2005), Ж.Муру-Д.Стрикленд (2018), А.Л'Юилье-Ф.Крауц-П.Агостини (2023), Дж.Кларк-М.Деворе-Дж.Мартинис (2025)

По химии: Э.Резерфорд (1908)

# Современные проблемы

Высокотемпературная сверхпроводимость (премия 1987),

Гетероструктуры (2003),

Графен (премия 2010),

Метрология и прецизионная спектроскопия (2005)

Лазерная фемтохимия (премия по химии 1999),

Квантовая запутанность (2022),

Квантовые точки, нити, (премия по химии 2023)

Макроскопическое туннелирование и квантование энергии в электрических цепях (2025)

Сверхсильные лазерные поля..



# 2025

Джон Кларк, Мишель Деворе и Джон Мартинис

За открытие макроскопического квантово-механического туннелирования и квантования энергии в электрических цепях.

Показали, что квантовые эффекты могут проявляться в системах, видимых невооруженным глазом:

- макроскопический ток протекает через слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника.
- Энергия колебательного контура строго дискретна

# Нобелевские премии по физике

2018 Жерар Мору (Gerard Mourou), Донна Стрикланд (Donna Strickland)

*“For their method of generating high-intensity, ultra-short optical pulses”*

«За метод генерации высокоинтенсивных ультракоротких  
оптических импульсов»

2023 Анн Л'Юилье (Anne L'Huillier), Ференц Крауц (Ferenc Krausz), Пьер  
Агостини (Pierre Agostini)

*“For experimental methods that generate attosecond pulses of light for  
the study of electron dynamics in matter”*

«За экспериментальные методы генерации аттосекундных  
импульсов света для изучения динамики электрона в материи»

# ЗА ЧТО ПРИСУЖДЕНЫ??

**2018**

Предложена новая техника получения сверхмощных лазерных импульсов — усиление чирпированных импульсов

**2023**

Развиты методы генерации импульсов аттосекундной длительности

# Чем интересна генерация импульсов предельно короткой длительности?

1) **Исследование** быстропротекающих процессов с высоким временным и пространственным разрешением

**Диапазоны длительностей протекания различных процессов**

Нано	—	пико	—	фемто	—	атто	—	zepto	-	секундный
колебания в твердых телах -		молекулярные		- движение электронов		ядерные процессы				
и процессы на поверхностях		колебания		в атомах						

2) **Управление** быстропротекающими процессами с высоким временным и пространственным разрешением.

Например, лазерная фемтохимия - исследование химических реакций и управление их протеканием с помощью лазерных импульсов



# Чем интересна генерация импульсов предельно короткой длительности?

1) **Исследование** быстропротекающих процессов с высоким временным и пространственным разрешением

**Диапазоны длительностей протекания различных процессов**

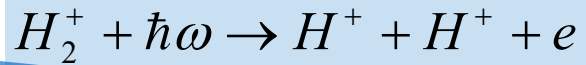
Нано	—	пико	—	фемто	—	атто	—	zepto - секундн
колебания в твердых телах -			молекулярные -		движение электронов		ядерные процессы	
и процессы на поверхностях			колебания		в атомах			

2) **Управление** быстропротекающими процессами с высоким временным и пространственным разрешением.

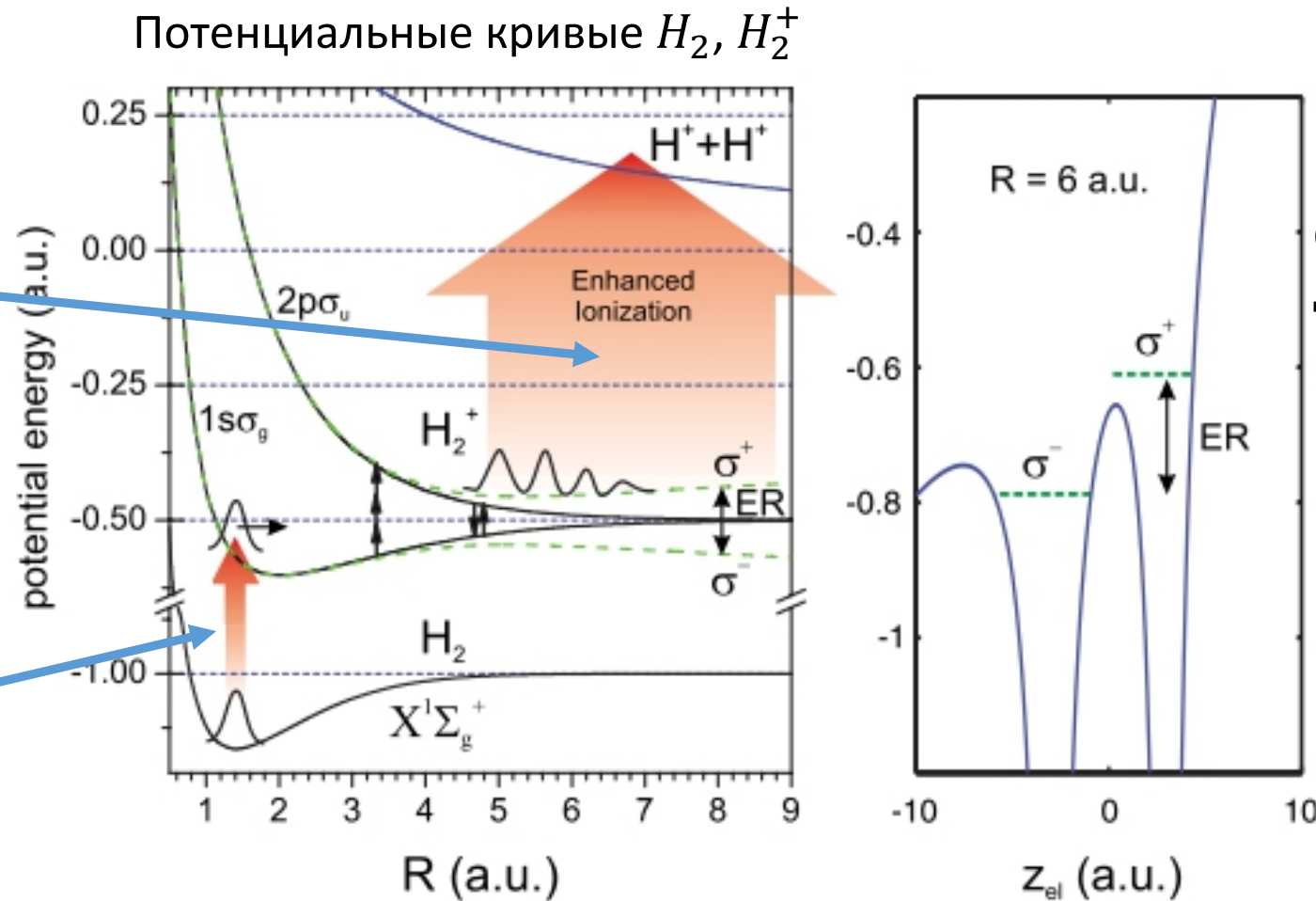
Например, лазерная фемтохимия - исследование химических реакций и управление их протеканием с помощью лазерных импульсов

3) **Короткие импульсы – высокие интенсивности излучения**

# Пример: Визуализация движения ядерного волнового пакета в молекулярных ионах водорода и дейтерия



Ионизация фс-импульсом и возбуждение колебательного движения в  $H_2^+$



Структура потенциала для электрона на расстоянии 6 ат. ед. и положение уровней в нем

# СВЕРХАТОМНЫЕ ПОЛЯ

Напряженность электрического поля в атоме -  $\sim 5 \times 10^9$  В/см,

Атомная интенсивность -  $\sim 3 \times 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>

## **Динамика вещества в экстремальных условиях**

- 1) Новые нелинейно-оптические процессы*
- 2) Термоядерный синтез*
- 3) Квантовая электродинамика в предельно сильных полях (рассеяние света на свете, рождение частиц из вакуума, парадокс Клейна)*
- 4) Астрофизика (моделирование процессов в Сверхновых и ядрах галактик)*

# GLOBAL LASER FACILITIES



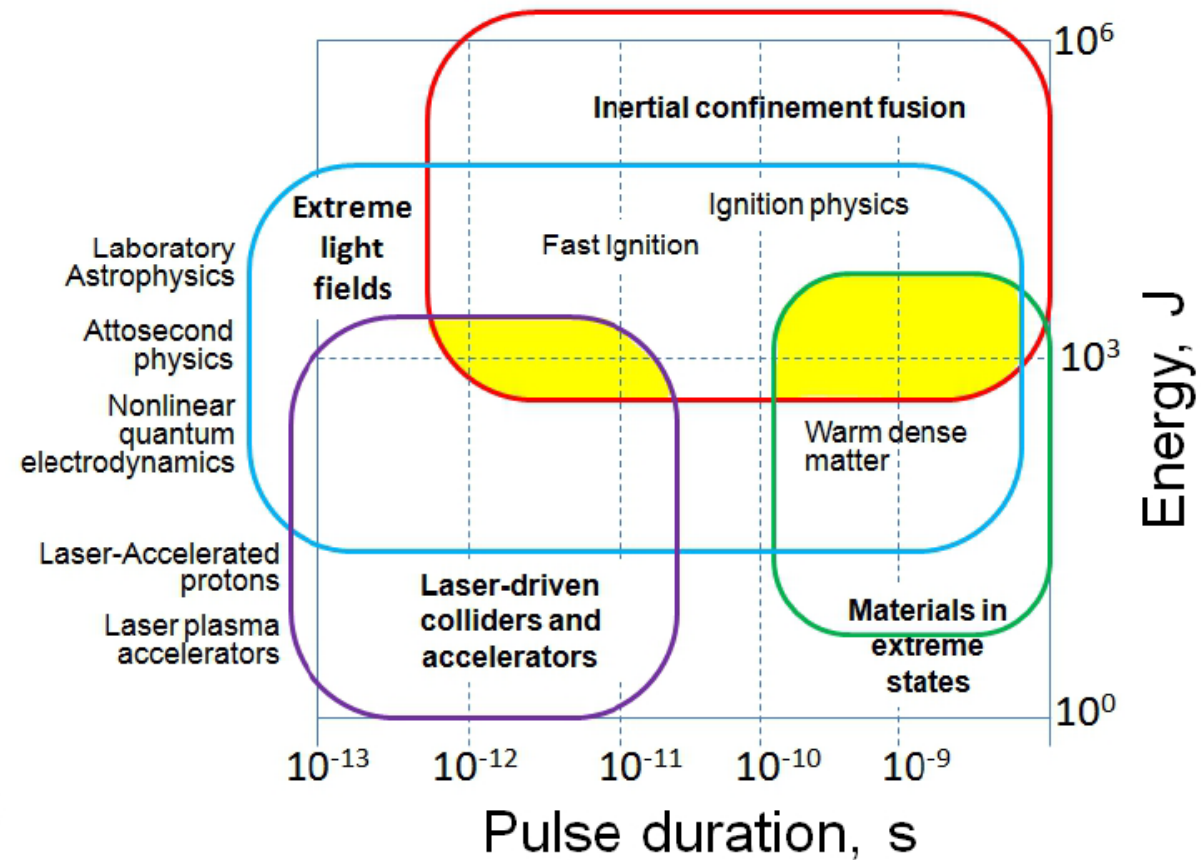
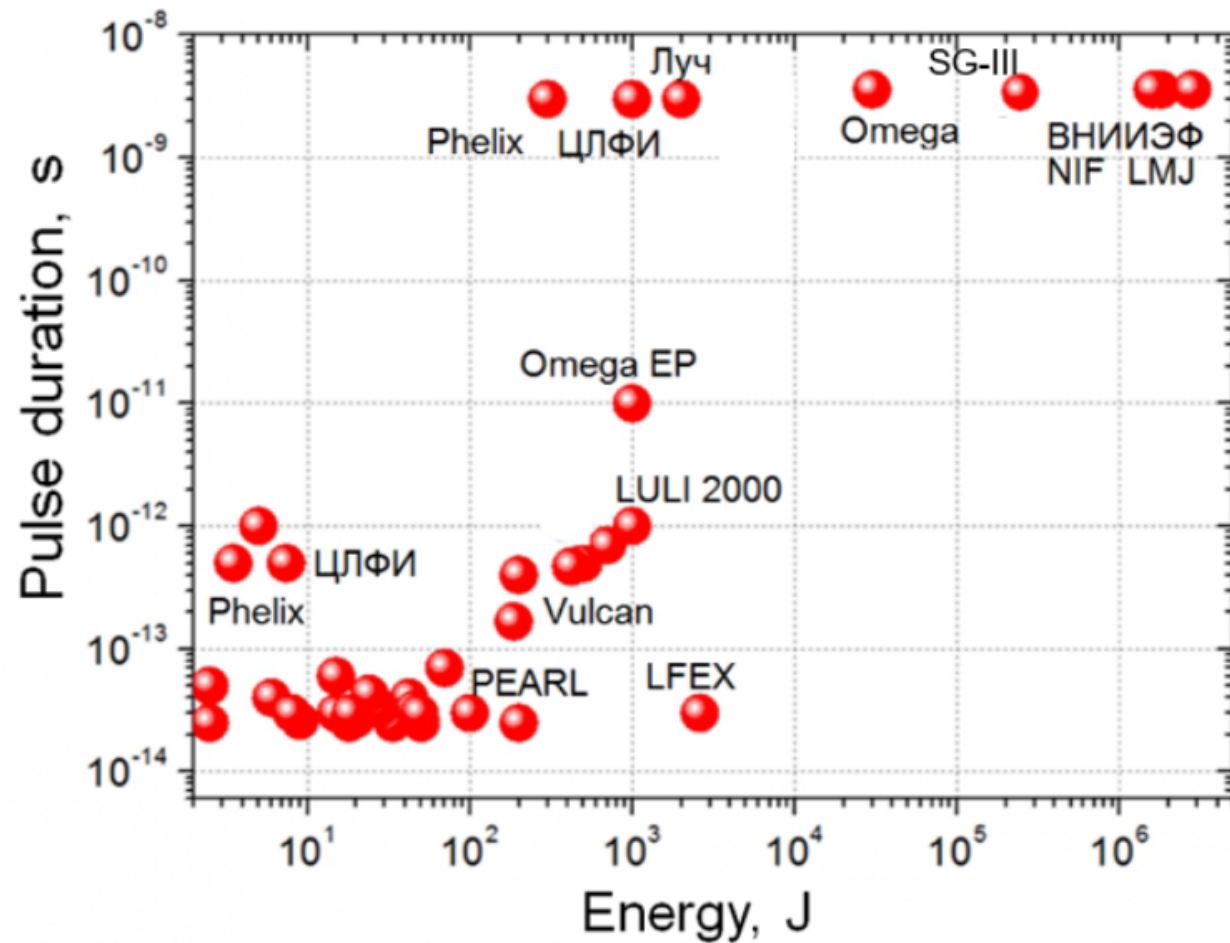
Из доклада проф. С.В. Попруженко на IX Международной конференции «Ultrafast Optical Science» 29.09-02.10.2025



# GLOBAL LASER FACILITIES



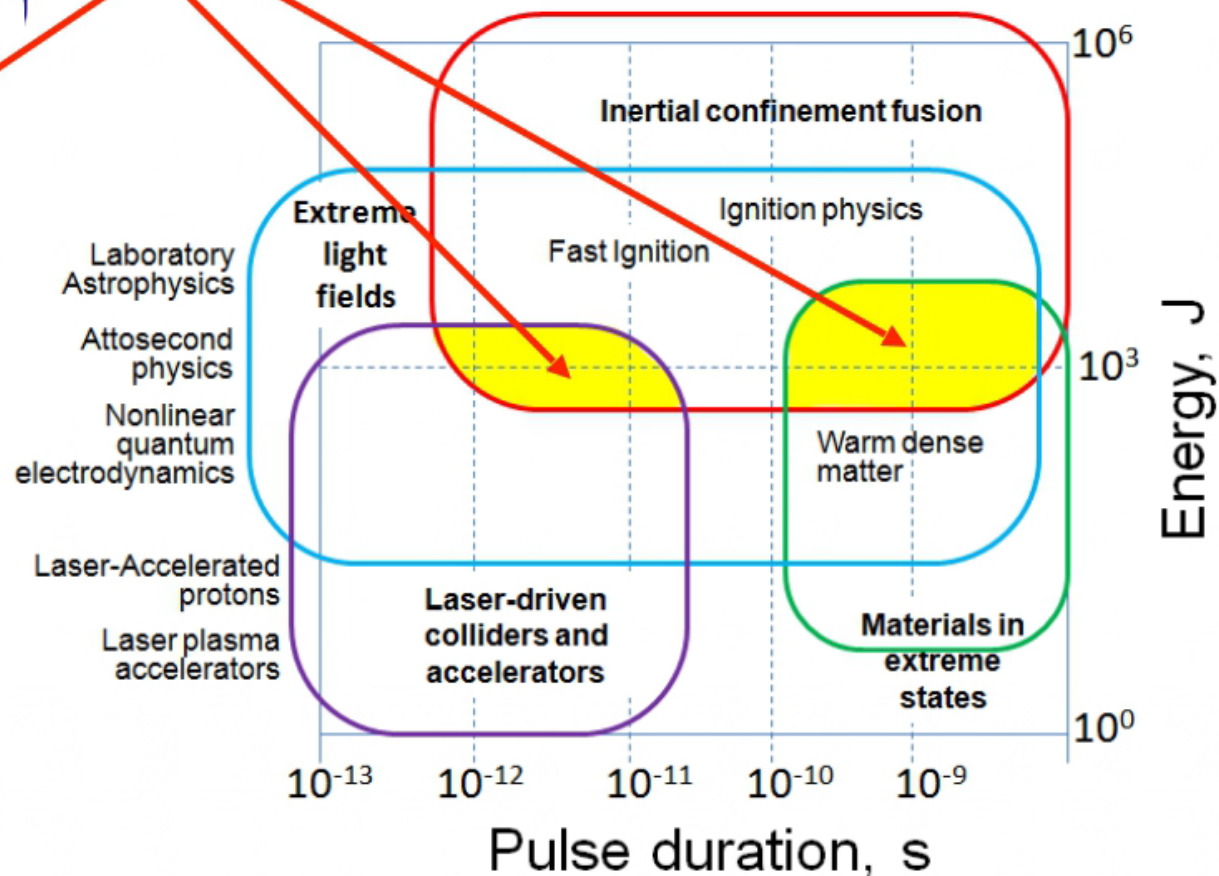
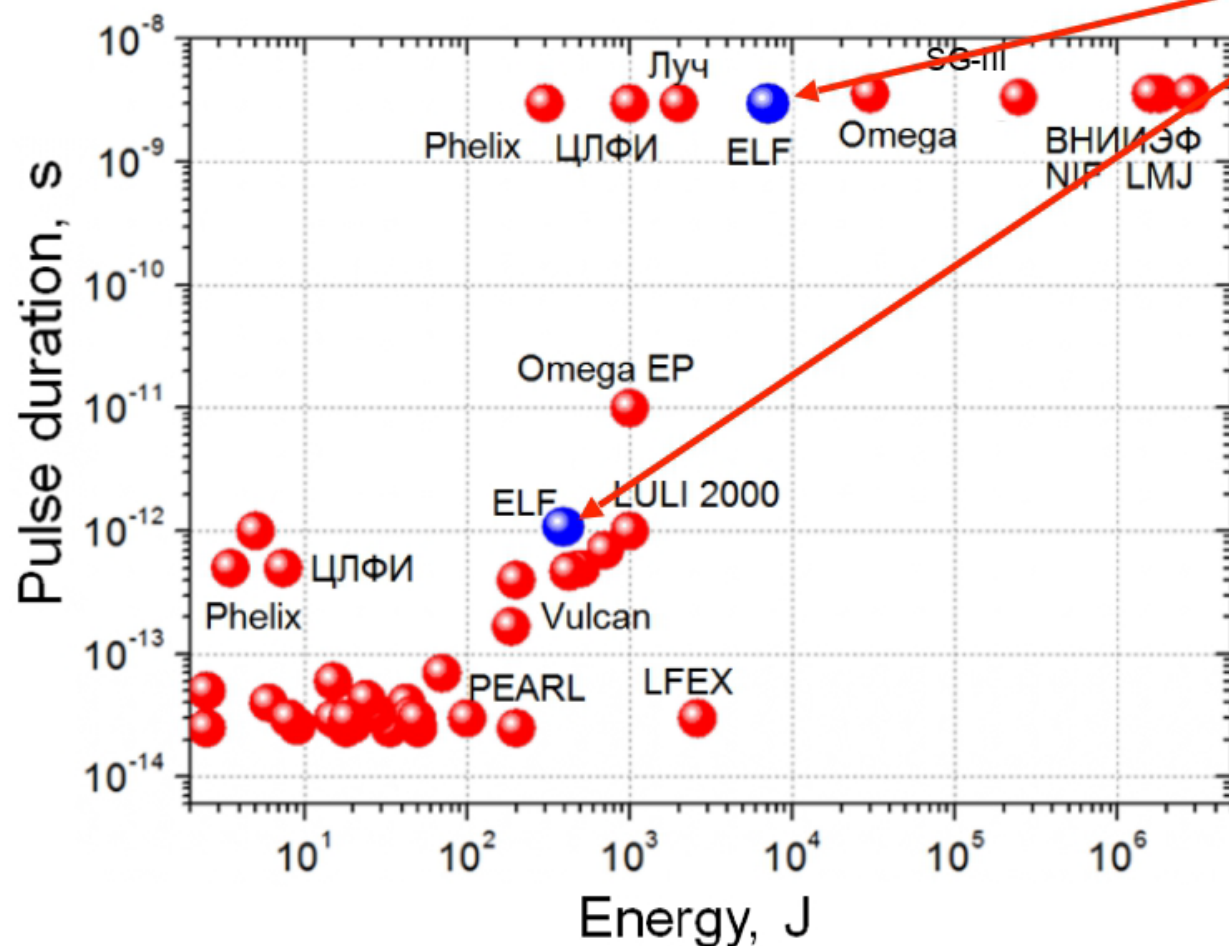
# Laser facilities for research in the field of high energy density physics





# Laser facilities for research

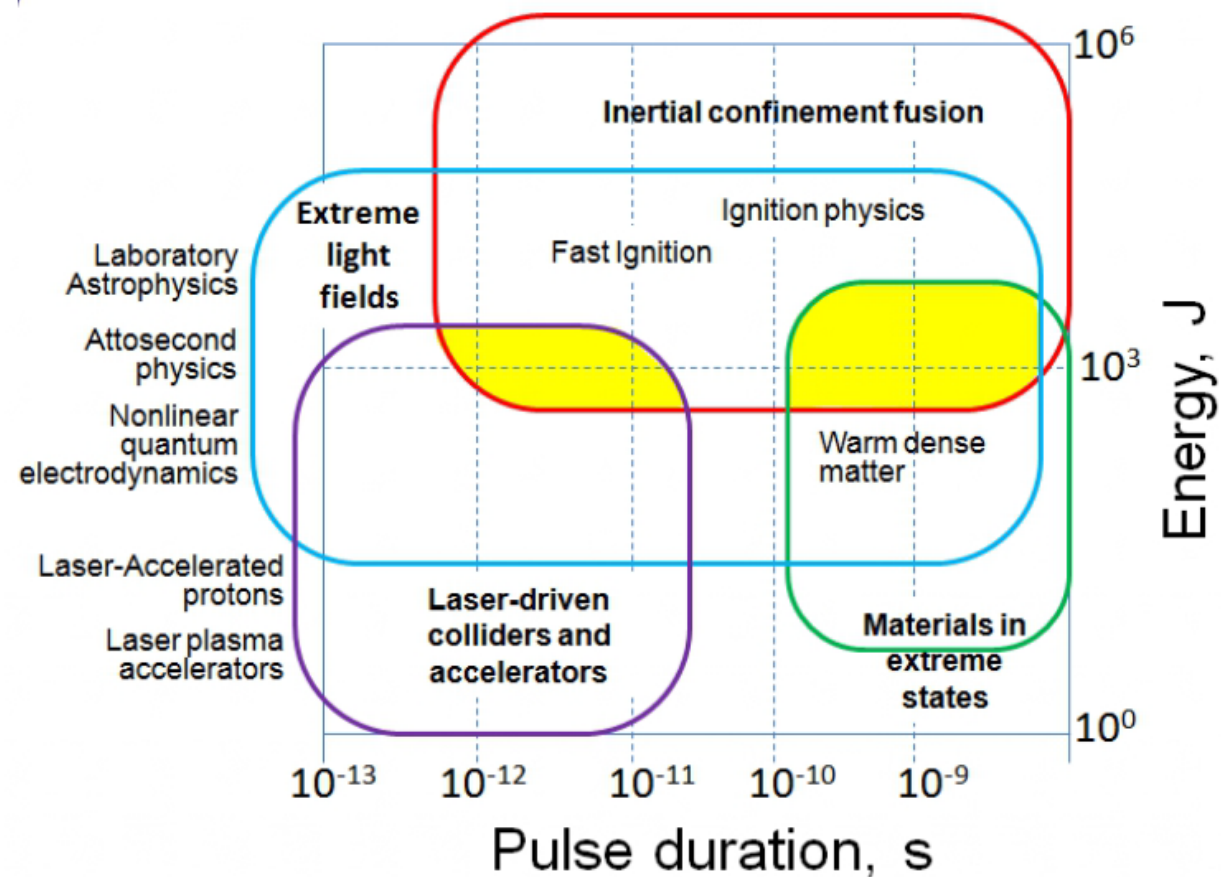
in the field of high energy density physics



# Laser facilities for research in the field of high energy density physics

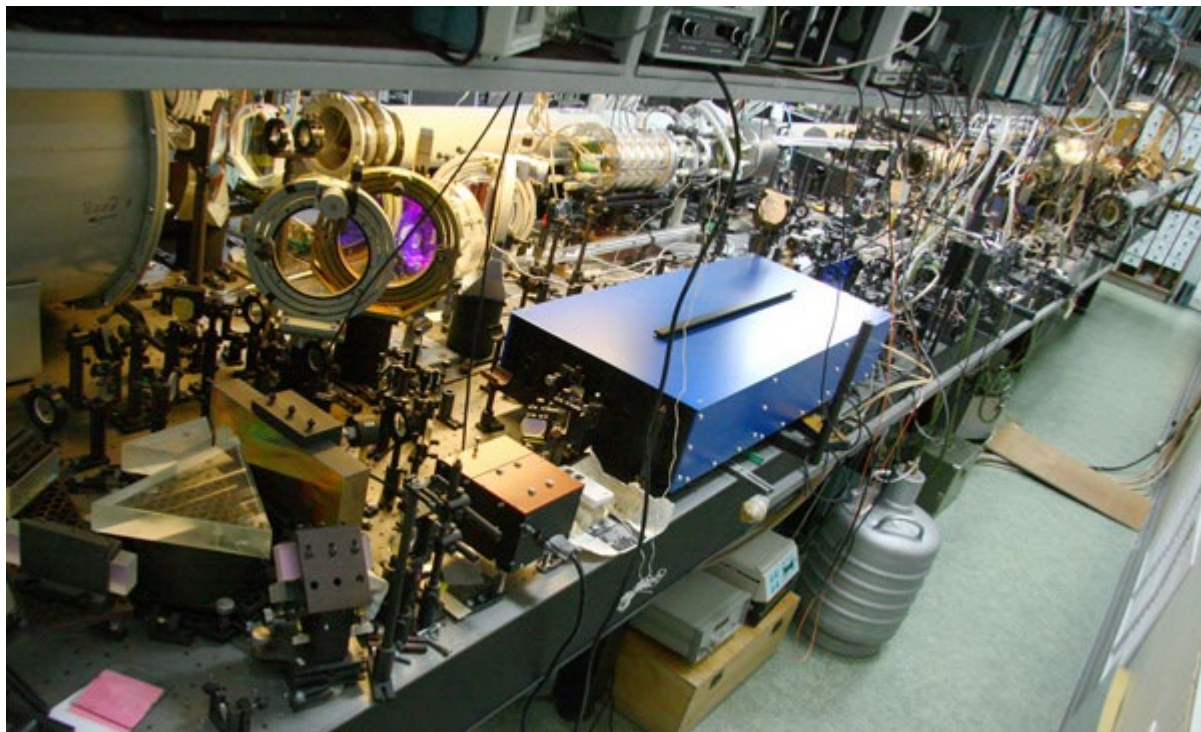


ELF parameters	ns-channel	ps-channel
Pulse duration	$(1,0 - 20) \cdot 10^{-9}$ s	$0,7 \cdot 10^{-12}$ s
Energy per pulse (max.)	4000 J ( $2\omega/3\omega$ ) (10 ns)	200 J (1053 nm)
Power Density (Max.)	$10^{16}$ W/cm <sup>2</sup>	$10^{20}$ W/cm <sup>2</sup>



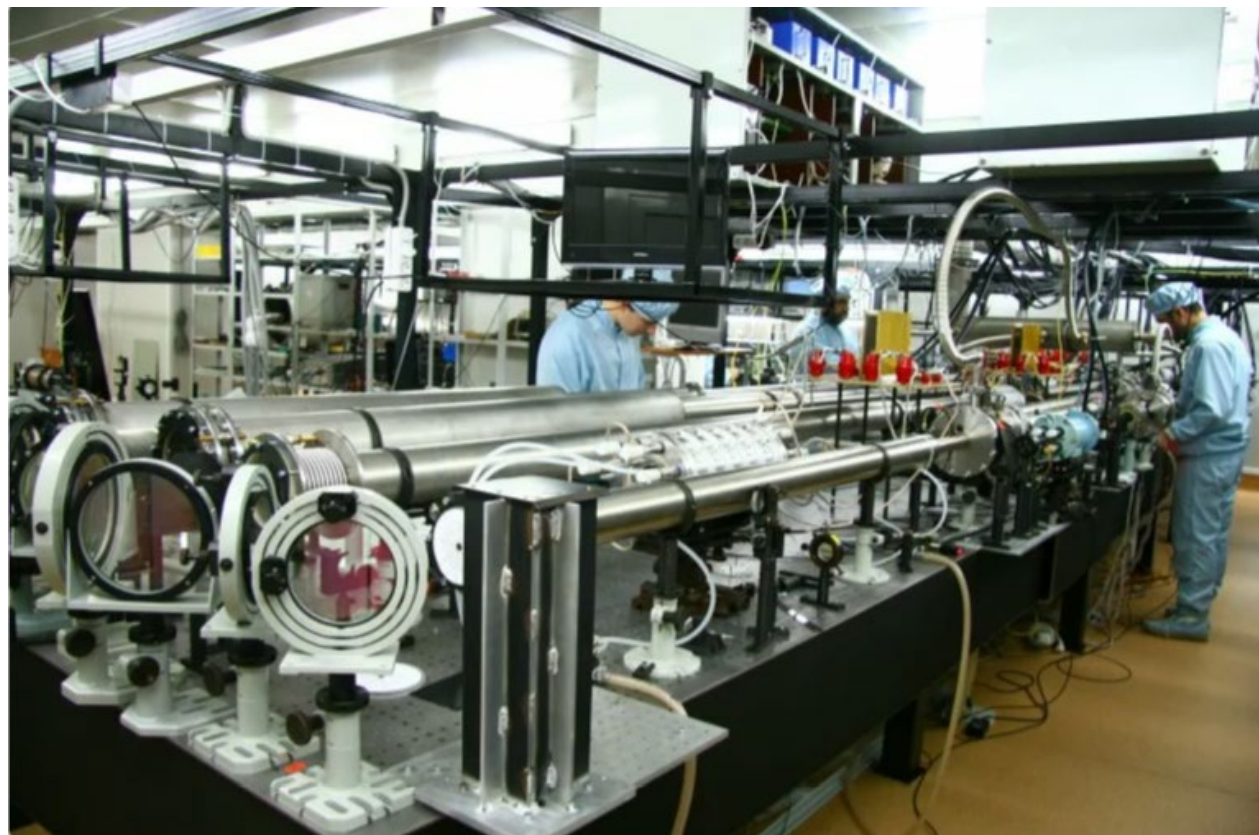


# Лазерные установки ИПФ РАН, Нижний Новгород



2006: пол-петтаваттный лазер ИПФ РАН:  $6 \times 10^{14}$  Вт

2021: Планируемая мощность  $2 \times 10^{17}$  Вт



# Чирпированные импульсы и оптическая компрессия СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ

1) Лазер на кристалле титаната - сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ )

Большая ширина линии усиления – возможность генерации коротких импульсов

2) Технология CPA - Chirped Pulse Amplification (1985)

Чирпированный импульс – что это такое?

$$E(t) = E_0 \cos(\omega(t)t), \quad \text{например } \omega(t) = \omega_0 + \alpha(t - t_0)$$

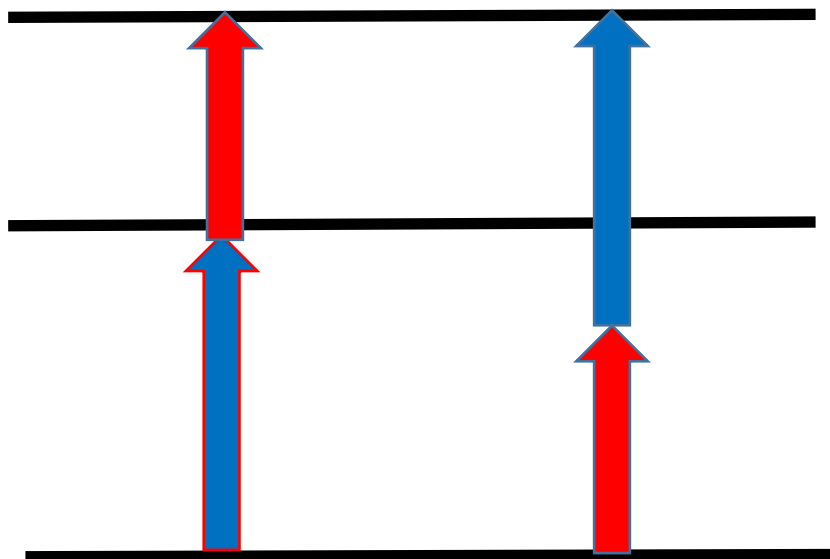
$\alpha < 0$  – красный чирп

$\alpha > 0$  – голубой чирп

Происхождение чирпа – среда с дисперсией: разные частотные компоненты перемещаются в пространстве с разной скоростью. Нормальная дисперсия – красный свет движется быстрее синего

# Чирпированный импульс

Возбуждение атома чирпированным импульсом

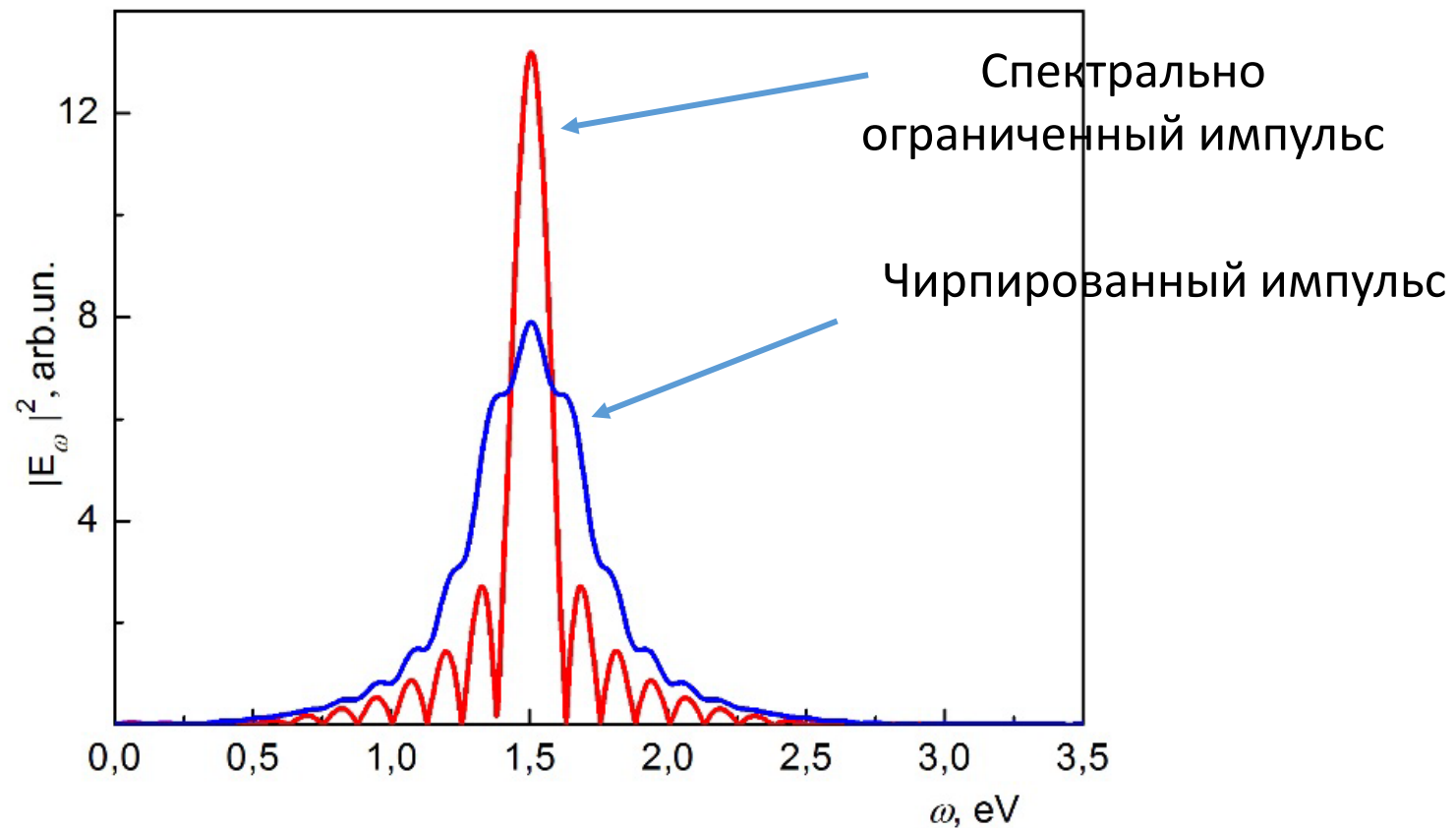


Красный чирп  
(частота падает)

Голубой чирп  
(частота растет)

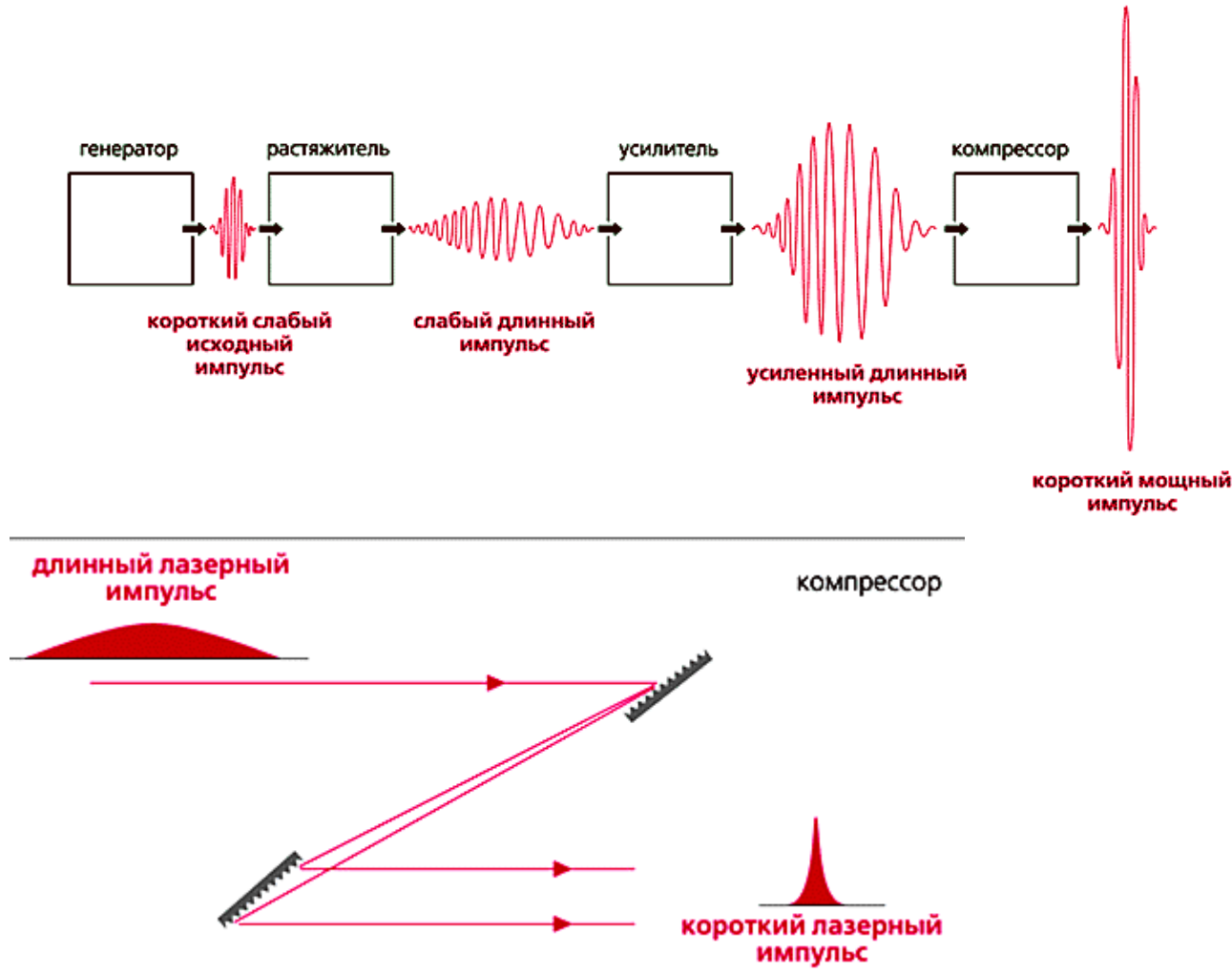
эффективное  
возбуждение

не возбуждает



# Усиление чирпированных импульсов

CPA - Chirped Pulse Amplification (1985) G.Mourou, D. Strickland



Уширение спектра происходит в нелинейной среде  
фазовая самомодуляция

$$E = E_0 \exp(i(kz - \omega t)) \quad k = n\omega/c \quad n = n_0 + n_2 I$$

дополнительный набег фазы  $\Delta\varphi(t) = \frac{\omega}{c} n_2 I(t) L$

$$\Delta\omega = \frac{d\Delta\varphi}{dt} = \frac{\omega}{c} L n_2 \frac{dI(t)}{dt} \longrightarrow \Delta\omega \sim \frac{\omega}{c} L n_2 \frac{I_0}{\tau_p}$$

предельное сжатие  $\tau_p^{(\min)} \sim \frac{2\pi}{\Delta\omega} \sim \frac{2\pi c \tau_p}{\omega n_2 I_0 L}$

Возможно сжатие импульсов TiSa лазера  
вплоть до одного периода колебаний  $\sim 2$  фс

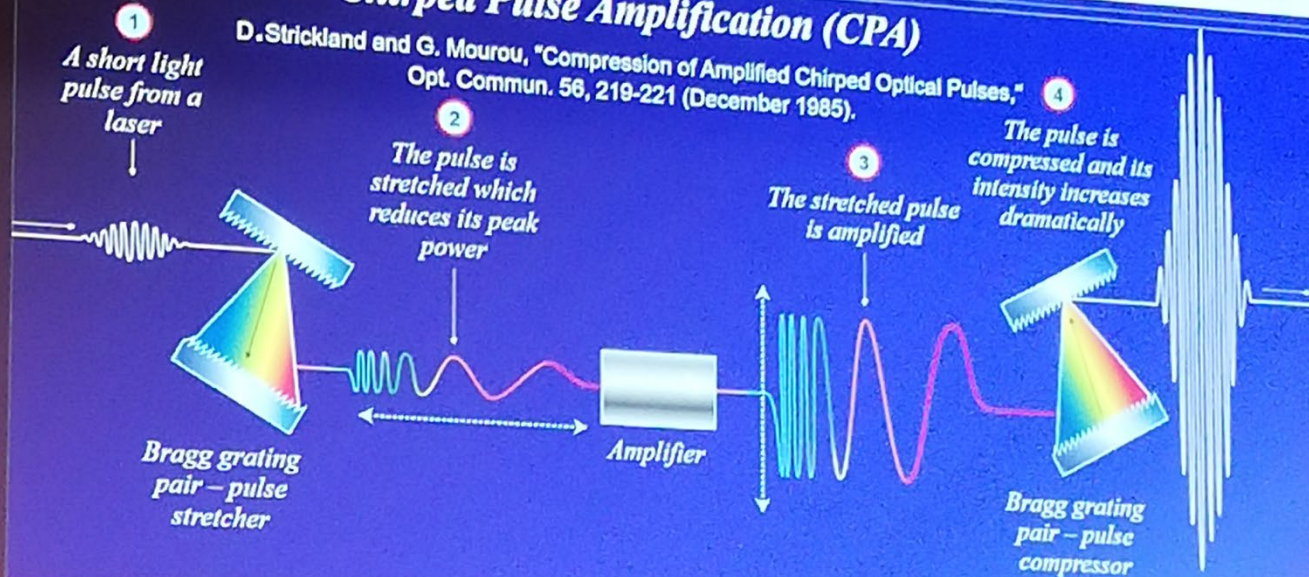


# CPA - Chirped Pulse Amplification G.Mourou, D. Strickland (1985)

*A PASSION FOR EXTREME LIGHT*  
*For the greatest benefit to human kind (Alfred Nobel)*

## Chirped Pulse Amplification (CPA)

D. Strickland and G. Mourou, "Compression of Amplified Chirped Optical Pulses,"  
Opt. Commun. 56, 219-221 (December 1985).



Нобелевская премия, 2018  
«За метод генерации  
высокоинтенсивных  
ультракоротких оптических  
импульсов»

44<sup>th</sup> Int. Conference on Infrared,  
Millimeter and Terahertz Waves  
(IRMMW THz-2019)  
Paris, France, September 1-6, 2019

Optics Communications,  
Vol. 56, no. 3, P. 219—221 (1985).



# CPA - Chirped Pulse Amplification G.Mourou, D. Strickland (1985)





# Нобелевская премия по физике, 2023

*«За экспериментальные методы генерации аттосекундных импульсов света для изучения динамики электрона в материи»*

Анн Л'Юилье (Anne L'Huillier), Ференц Крауц (Ferenc Krausz), Пьер Агостини (Pierre Agostini)



High Field Attosecond Physics, 2005  
Oberurgl, Austria



Laser Physics Workshop, 2009,  
Barcelona, Spain



ATTO-2013, Paris, France

# Генерация аттосекундных импульсов

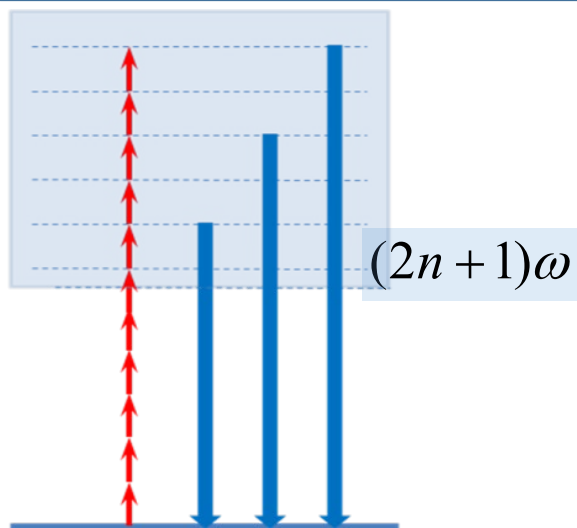
Многоквантовый фотоэффект (Н.Б. Делоне, 1964) и надпороговая ионизация атомов (Р. Agostini, 1979)

В экспериментах Н.Б.Делоне наблюдалась многоквантовая ионизация атомов ксенона в поле излучения рубинового лазера ( $\hbar\omega = 1.78$  эВ). Потенциал атома ксенона равен  $I_i = 12.13$  эВ. Для ионизации необходимо поглощение  $N = [I_i/\hbar\omega] + 1 = 7$  квантов поля, а вероятность фотоионизации должна быть пропорциональна седьмой степени интенсивности излучения.

## Надпороговая ионизация

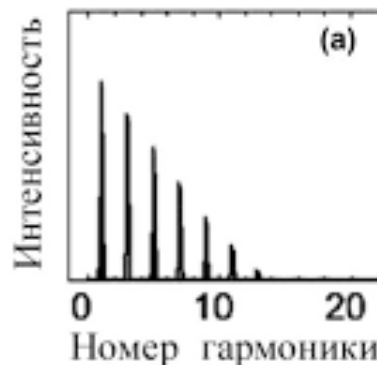
Ионизация атомов ксенона излучением *Nd* лазера ( $\lambda=1064$  нм  $\hbar\omega = 1.17$  эВ) с интенсивностью  $10^{12} - 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. 11-квантовый фотоэффект.

В континууме заселяются состояния с энергий  $E_n \approx (N_{\min} + n)\hbar\omega - I_i$



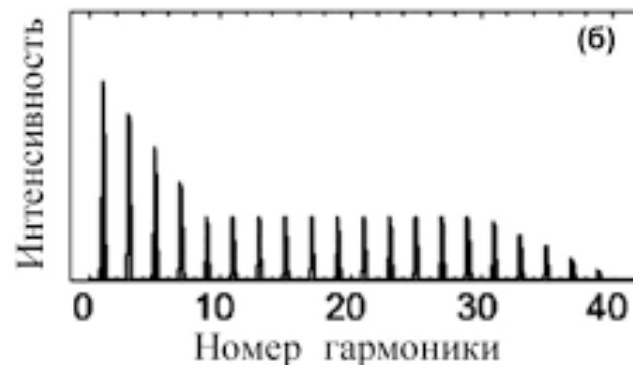
Излучение нечетных гармоник

## Спектр излучаемых гармоник



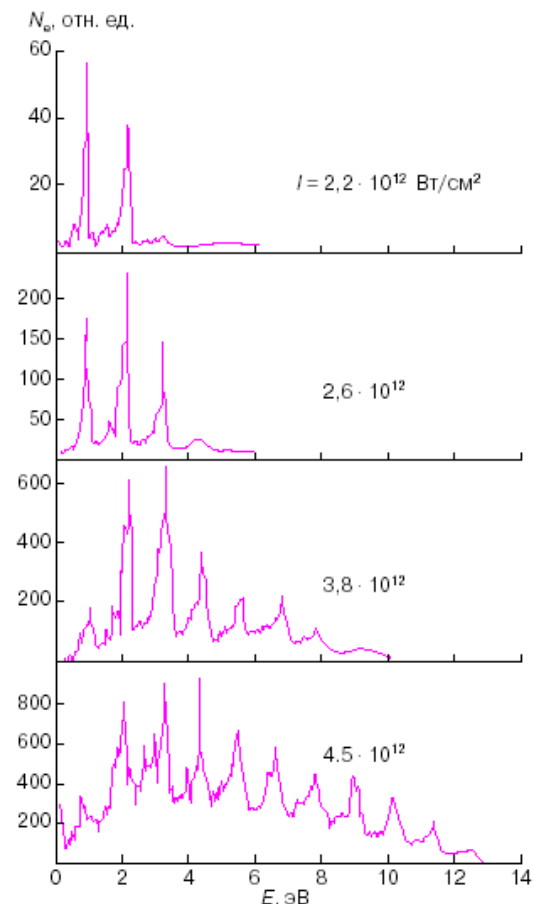
слабые поля

ТВ



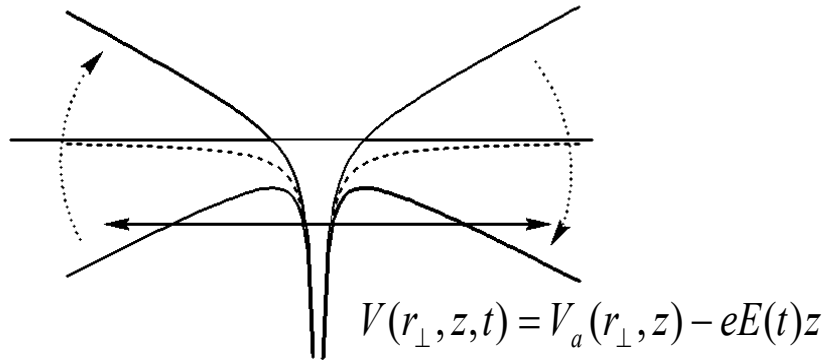
сильные поля

непертурбативный режим

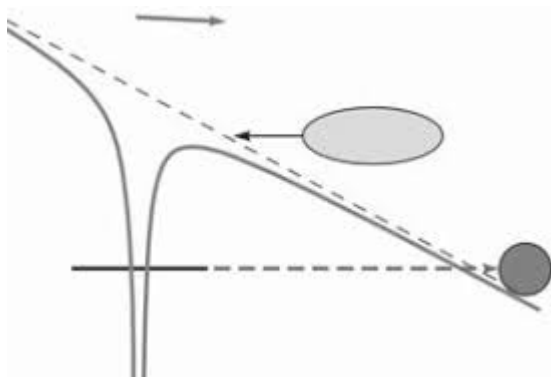


# Генерация аттосекундных импульсов в лазерной плазме

Пространственно – временная картина процесса

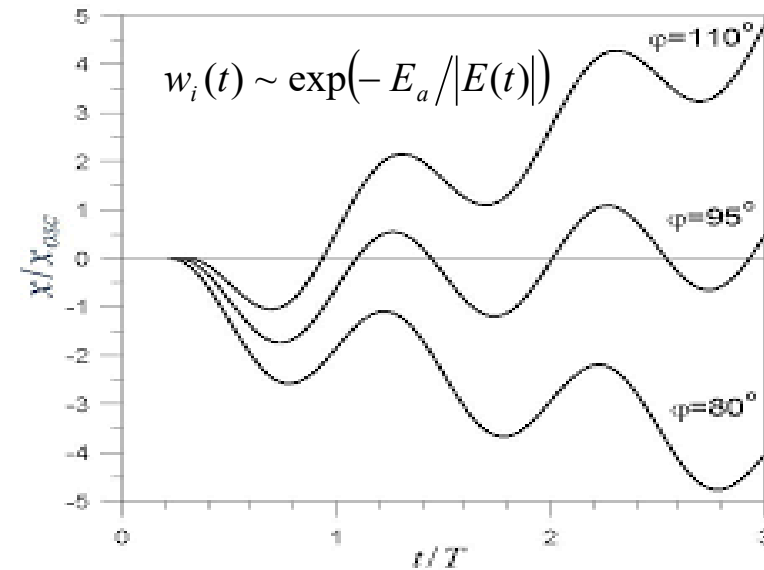


Атомный потенциал при наличии  
сильного лазерного поля



Эффект перерасеяния  
(P. Corkum, 1993)

Набор траекторий электрона в поле волны  
для различных фаз туннелирования из атома



$$E_a = \frac{4}{3} \cdot \frac{\sqrt{2mI_i^3}}{e\hbar}$$

$$E(t) = E_0 \sin \omega t$$

Теория фотоионизации Келдыша (1964)

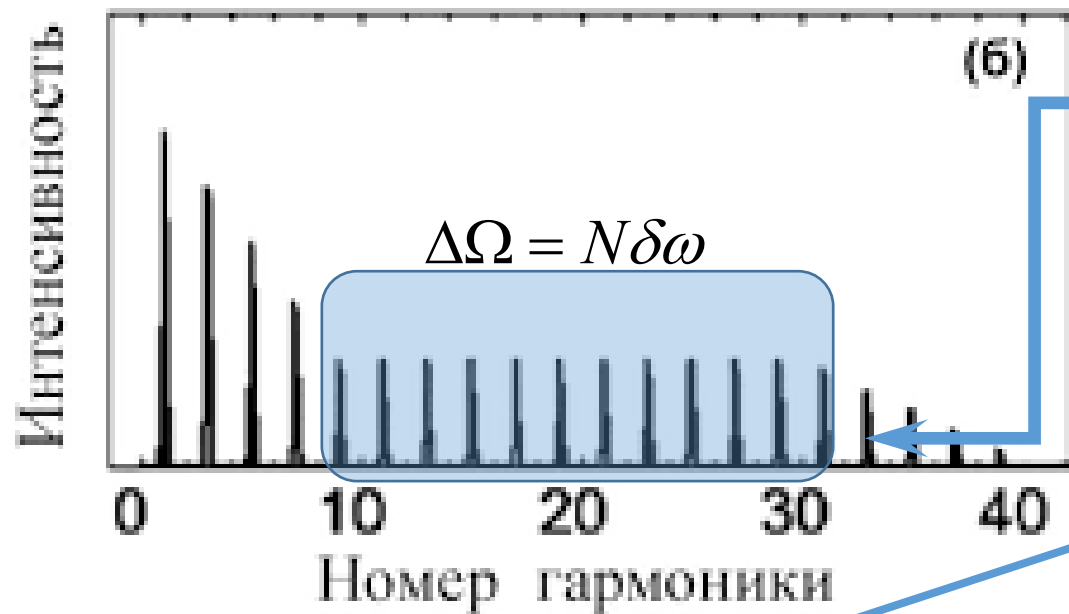
Переход из связанного начального состояния в волковский  
континуум в поле волны:

Низкие частоты – туннельный эффект,

Высокие частоты – многоквантовый фотоэффект

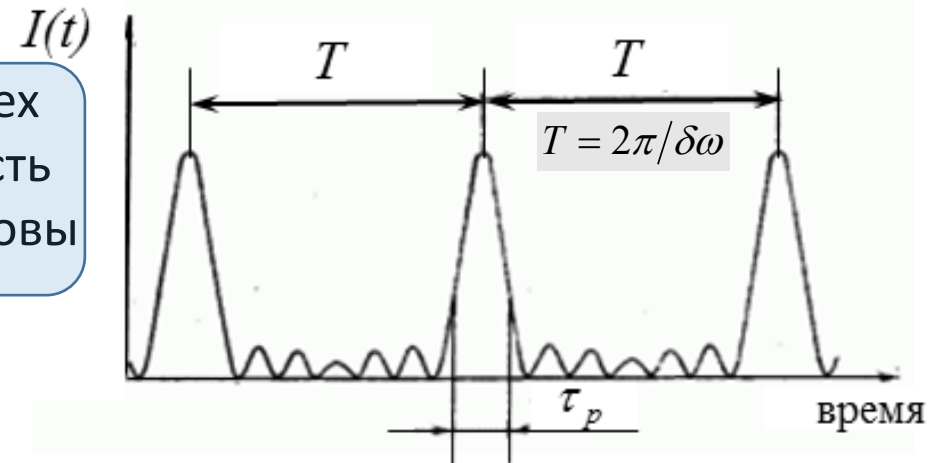
$$\gamma = \frac{\omega \sqrt{2mI_i}}{eE_0} \text{ параметр Келдыша}$$

# Генерация аттосекундных импульсов



$$\varepsilon_{\max} \approx 3.17\varepsilon_e \quad \varepsilon_e = e^2 E_0^2 / 4m\omega^2$$

Полагаем, что во всех модах напряженность поля и фаза одинаковы



$$E(t) = E_0 \exp(i\omega_{\min}t + \varphi) \sum_{n=0}^N \exp(i\omega_n t) = E_0 \exp(i\omega_{\min}t + \varphi) \frac{1 - \exp(iN\delta\omega t)}{1 - \exp(i\delta\omega t)}$$

$$I(t) \sim |E^2(t)| \sim \frac{\sin^2(N\delta\omega t/2)}{\sin^2(\delta\omega t/2)} \quad I_{\max} = N^2 I_0$$

Предельная длительность импульса

$$\tau_p \sim 2\pi/(N\delta\omega) \approx 2\pi/(N2\omega)$$

Для интенсивности Ti-Sa лазера  $3 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  получаем  $N \sim 100$

$$\tau_p \sim 30 \text{ ас}$$



# Достижения на сегодняшний день

Центр релятивистской лазерной науки (CoReLS)

Института фундаментальных наук в Южной Корее

**Интенсивность излучения в лазерном фокусе  $\geq 10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup> (2021)**

*Это эквивалентно фокусированию всего света, падающего на Землю от Солнца, в пятно диаметром всего 10 микрон*

*Предыдущий рекорд (2004) - лазер мощностью  $10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup>, Мичиганский университет.*

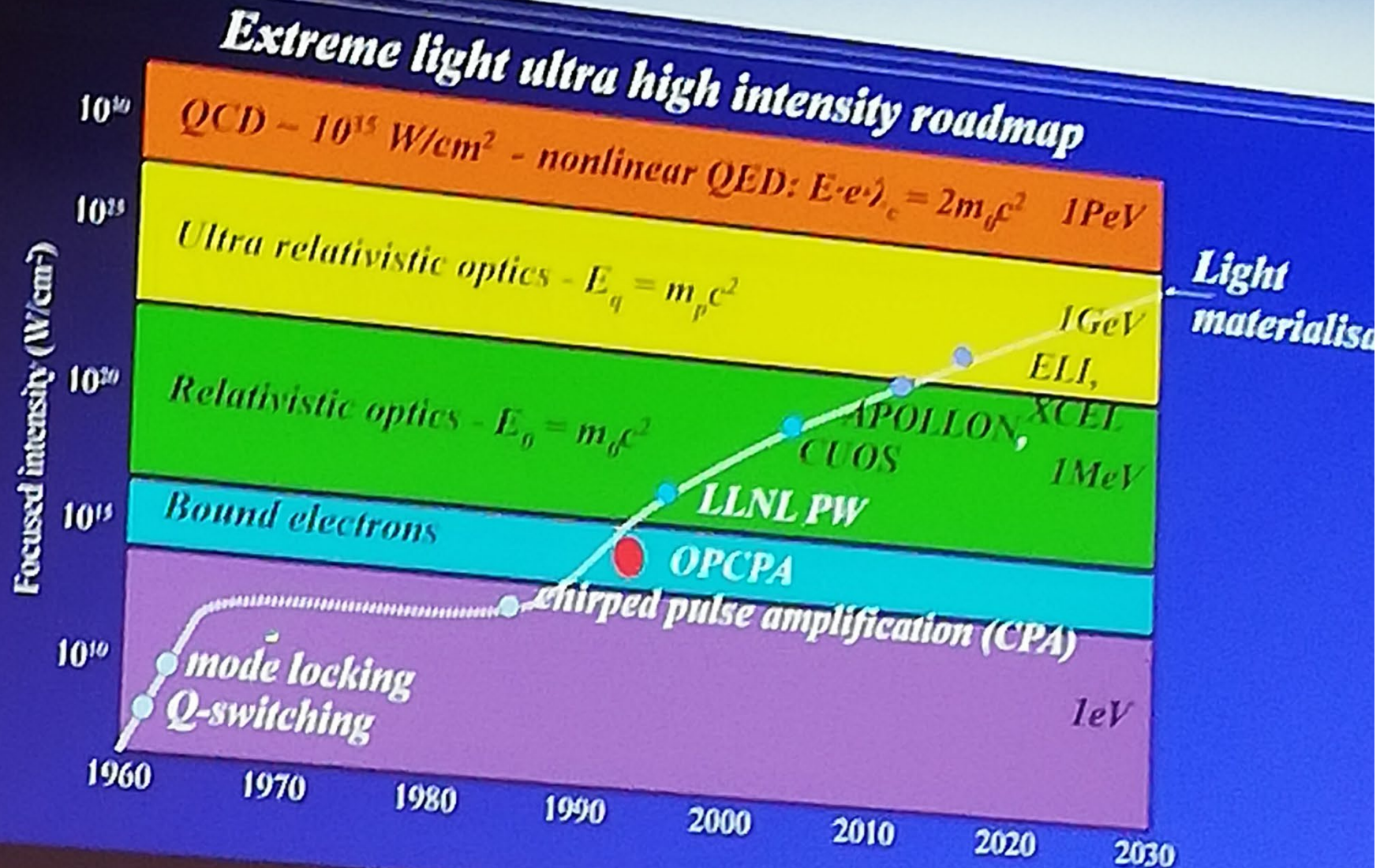
**Длительность импульса  $\sim 20$  ас (2017)**

*Эквивалентно мощности, в 1000 раз превышающей всю электрическую мощность на Земле, но продолжительностью менее 20 фемтосекунд*

# A PASSION FOR EXTREME LIGHT

For the greatest benefit to human kind (Alfred Nobel)

## History and prospects of laser physics







Спасибо за внимание!

