

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.Бининг-Г.Рорер (1986), Т.Хэнш
(2005), **Ж.Муру-Д.Стрикленд (2018), А.Л'Юилье-Ф.Крауц-П.Агостиини (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 Муру (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 Агостиани (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	-	зепто	-	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 – зепто - 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.

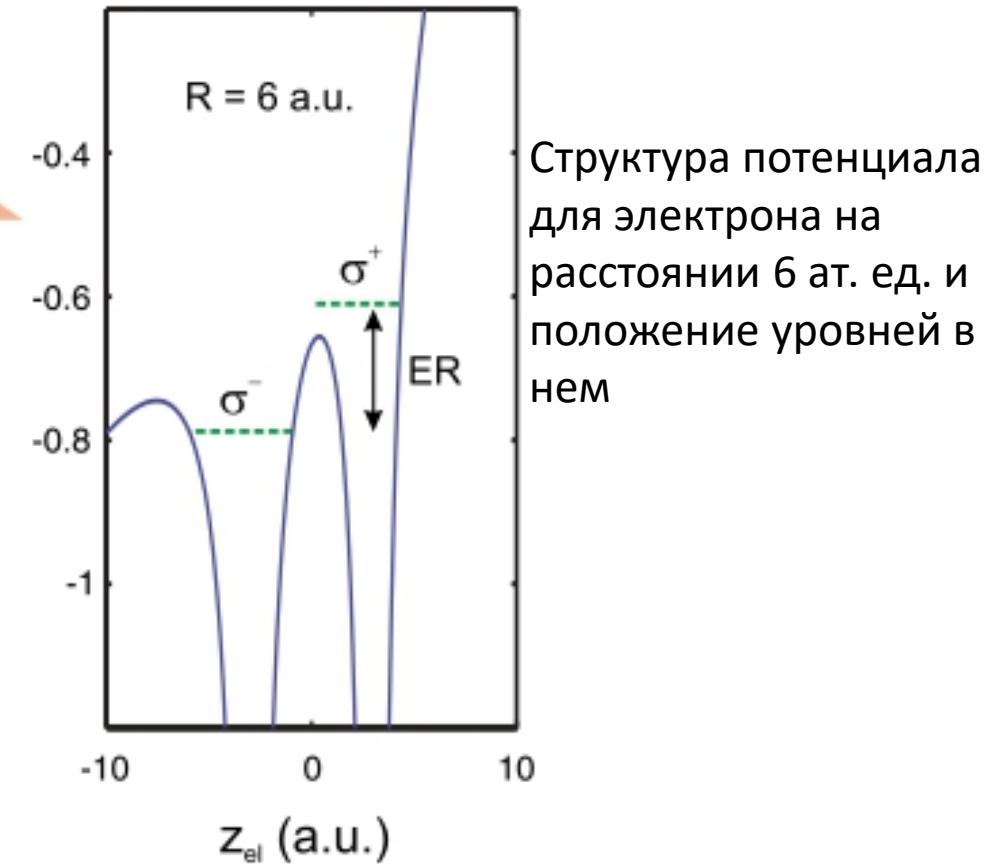
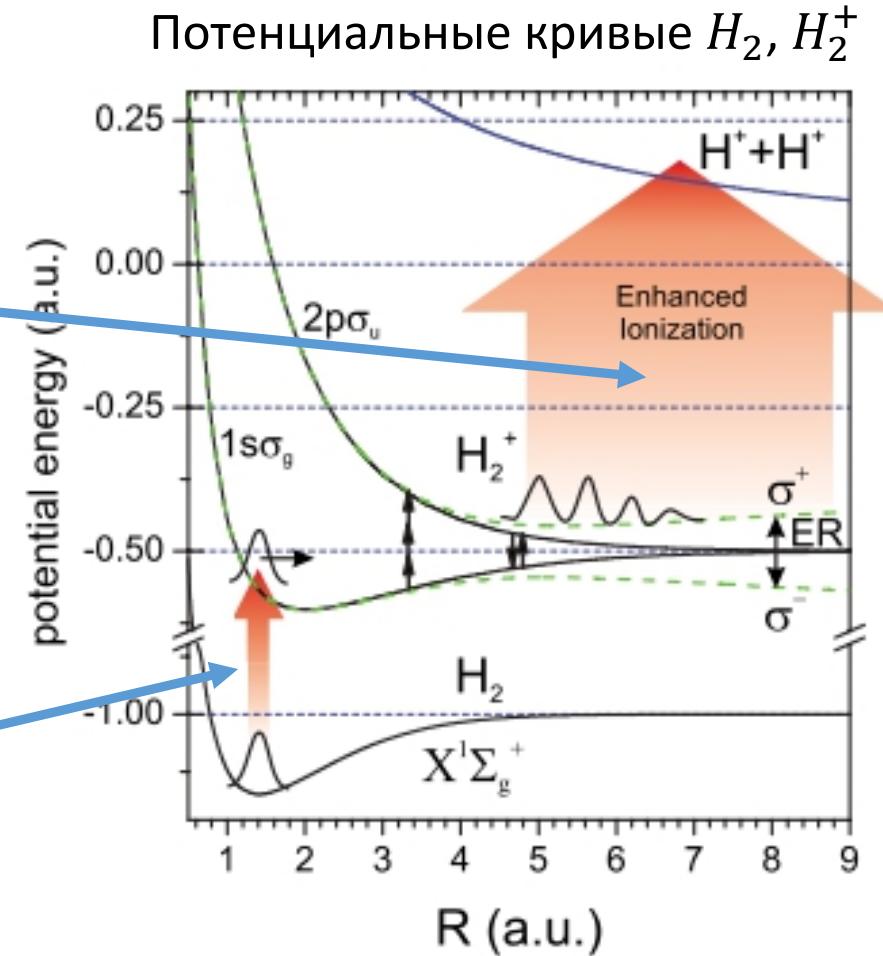
Например, лазерная фемтохимия - исследование химических реакций и управление их протеканием с помощью лазерных импульсов

3) Короткие импульсы – высокие интенсивности излучения

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

$H_2^+ + \hbar\omega \rightarrow H^+ + H^+ + e$

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



Взято из: A. Bandrauk, P. Corkum et al PHYSICAL REVIEW A 76, 013405, (2007)

СВЕРХАТОМНЫЕ ПОЛЯ

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

Атомная интенсивность - $\sim 3 \times 10^{16}$ Вт/см²

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

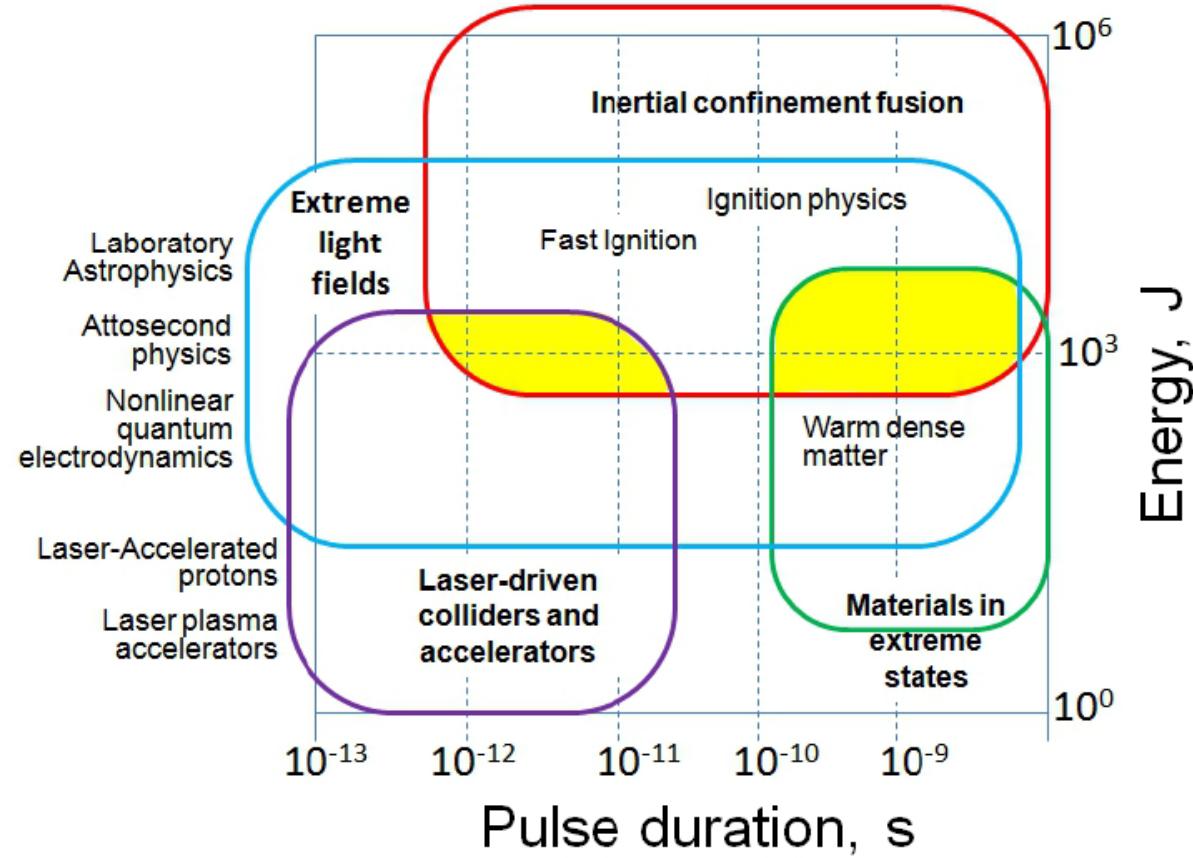
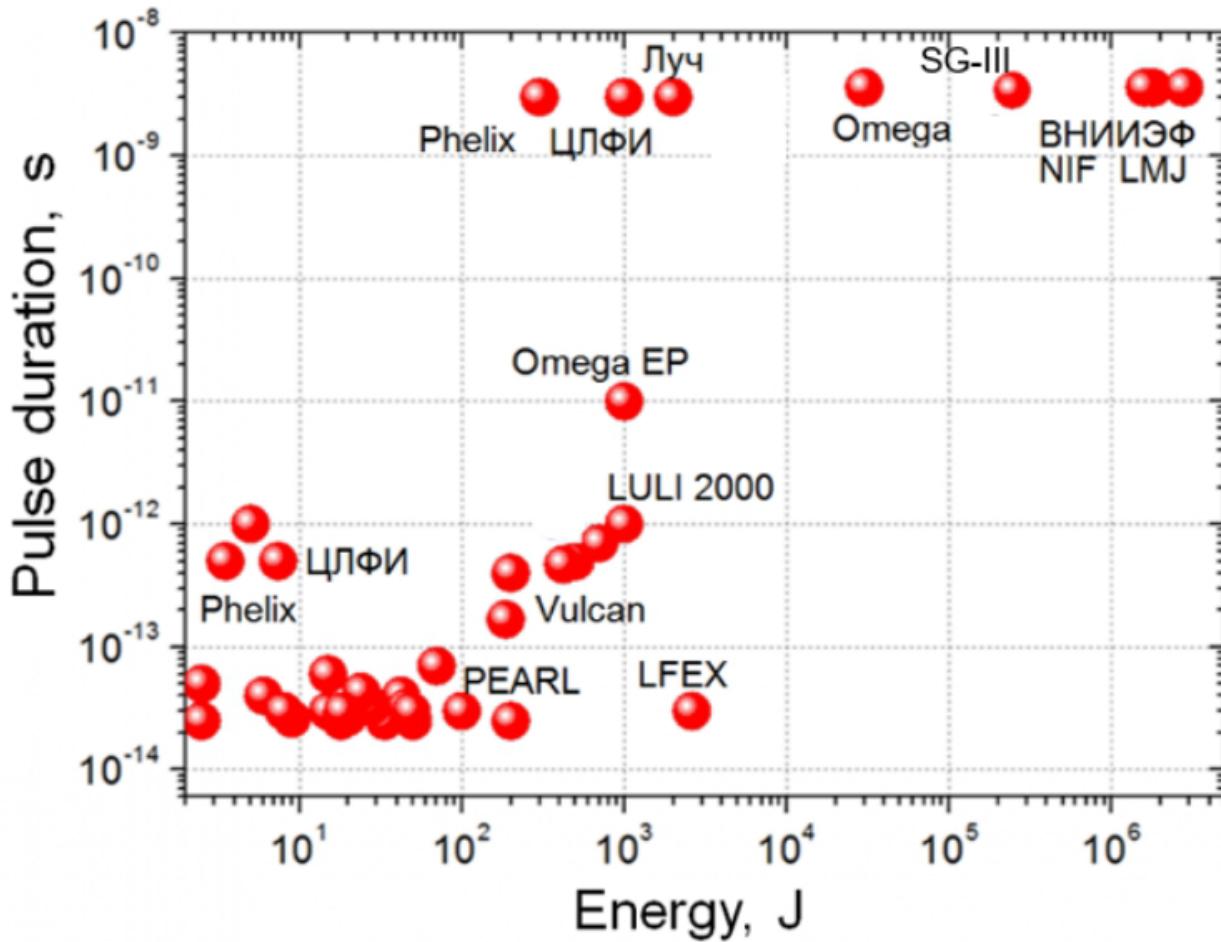


Из доклада проф. С.В. Попруженко на IX Международной конференции «Ultrafast Optical Science» 29.09-02.10.2025

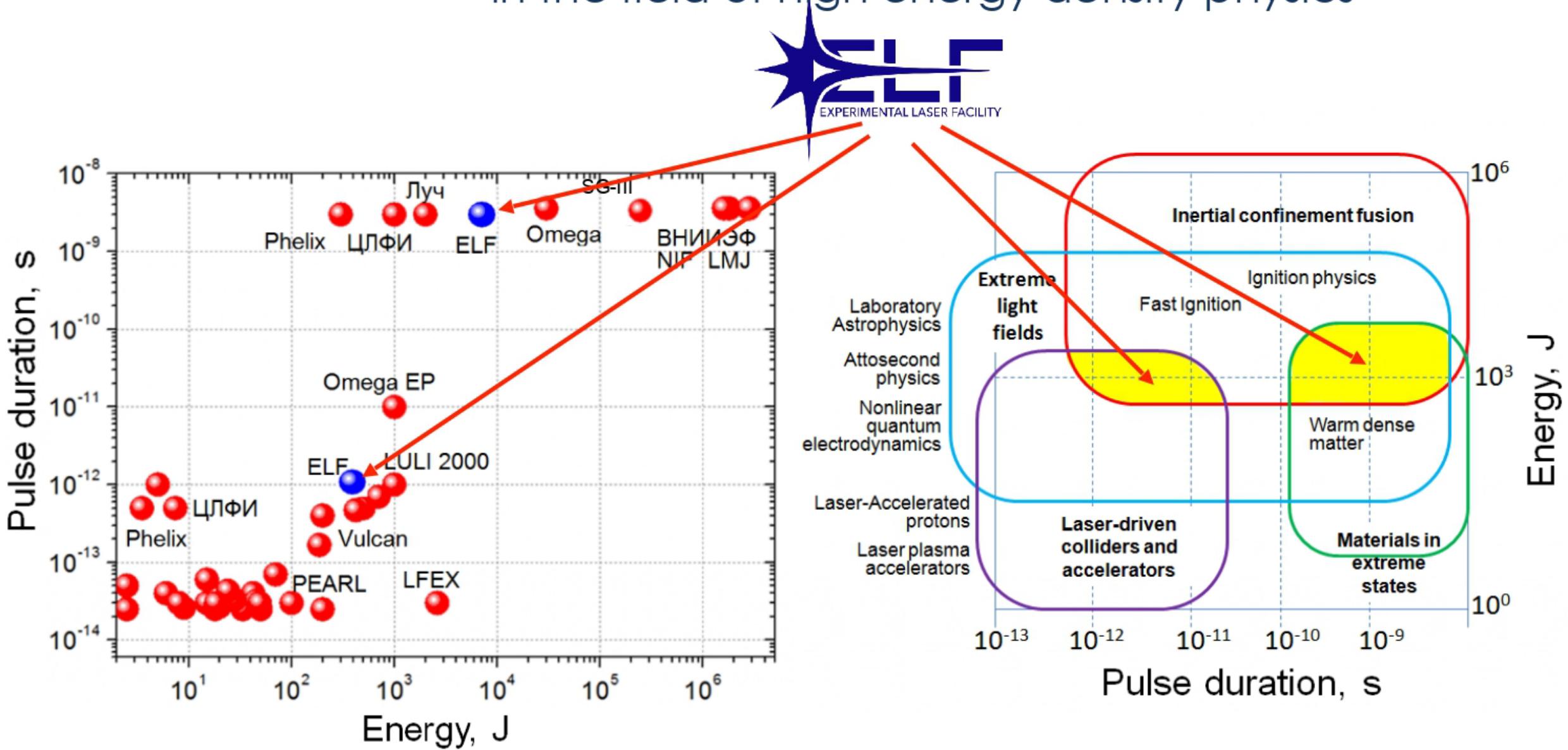
GLOBAL LASER FACILITIES



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



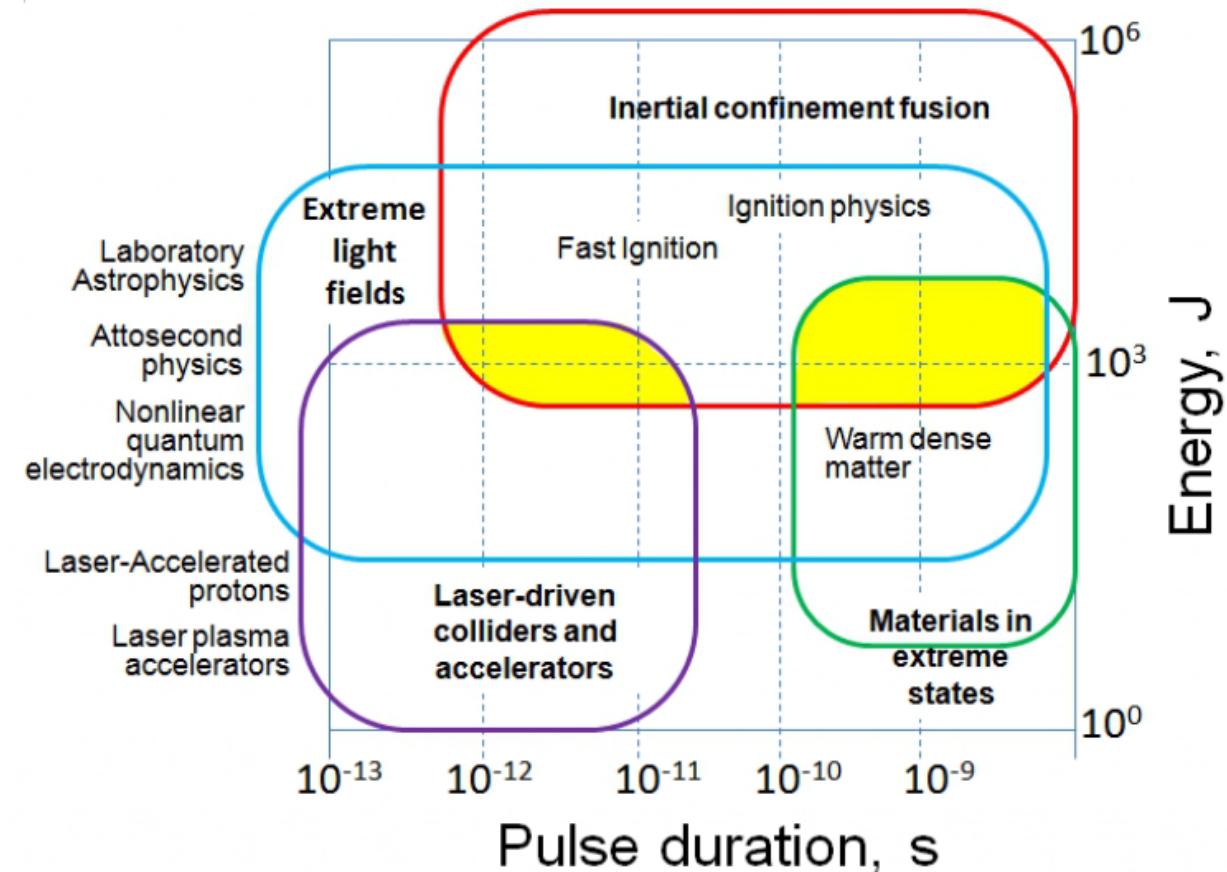
Laser facilities for research in the field of high energy density physics



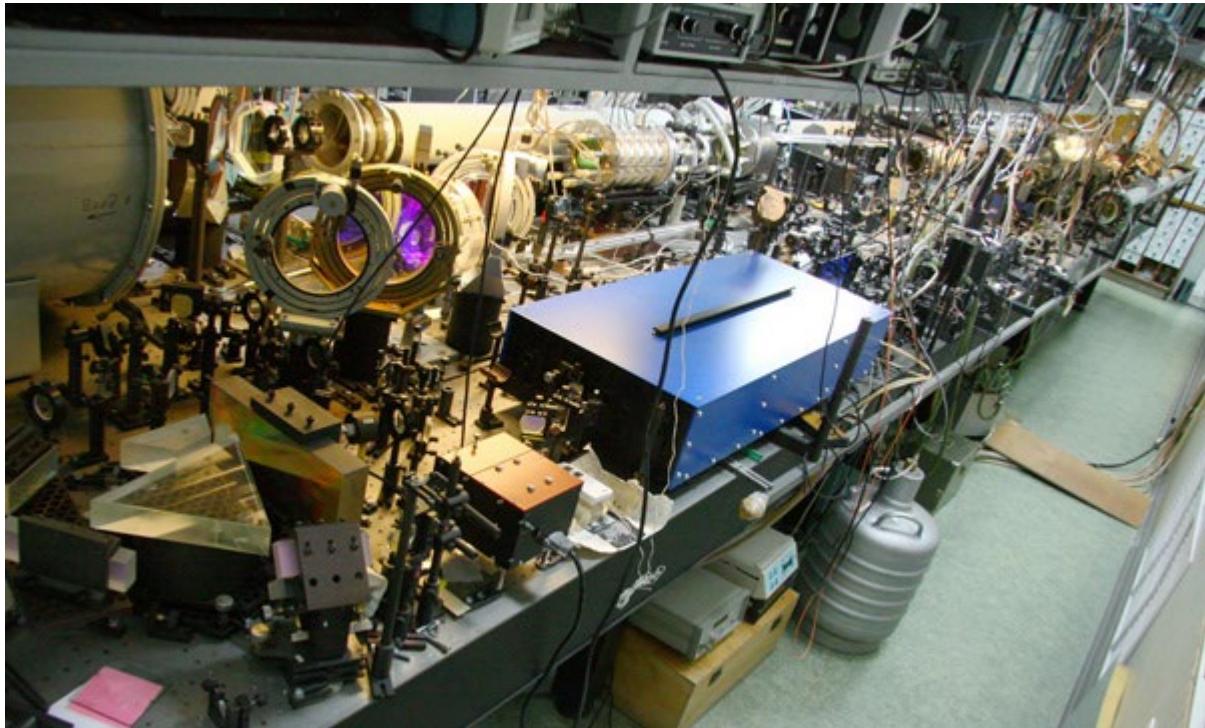
Laser facilities for research in the field of high energy density physics



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 ²	10^{20} W/cm ²

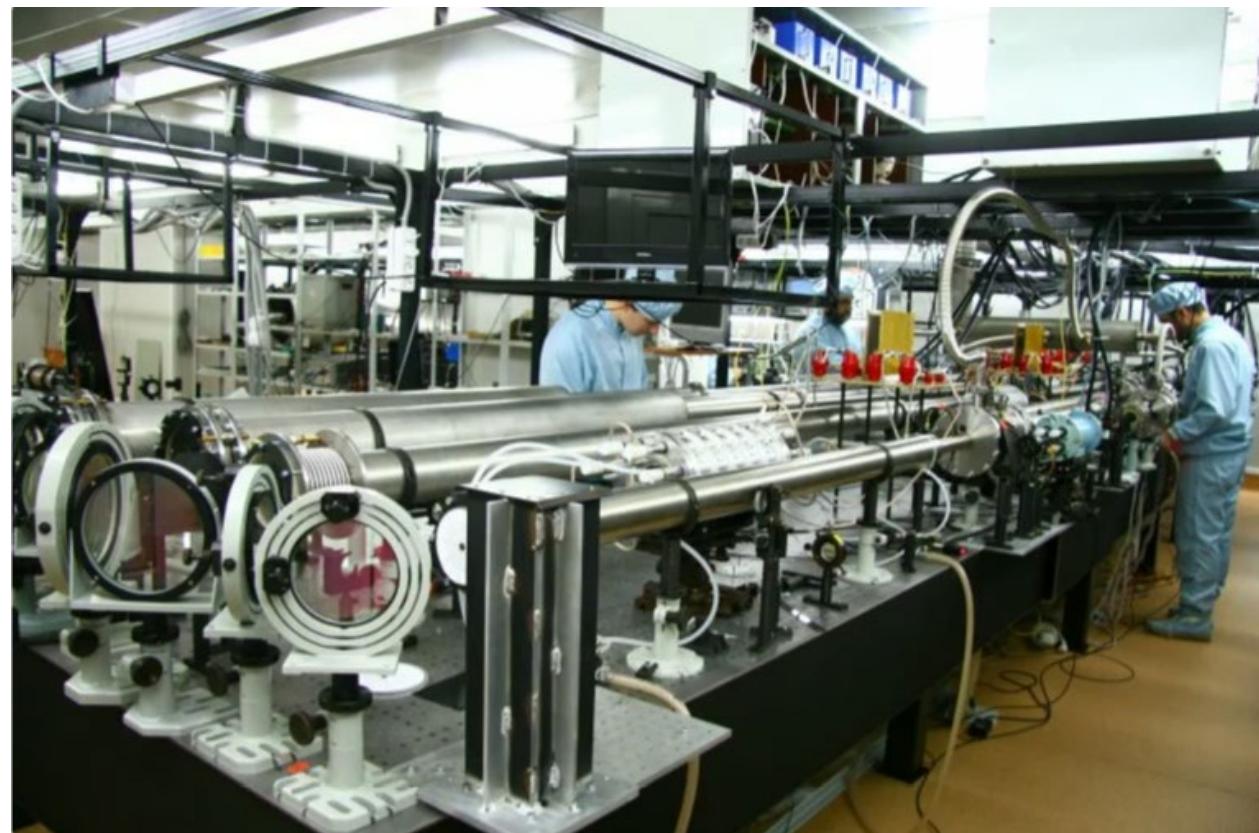


Лазерные установки ИПФ РАН, Нижний Новгород



2006: пол-петтаваттный лазер ИПФ РАН: 6×10^{14} Вт

2021: Планируемая мощность 2×10^{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?

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

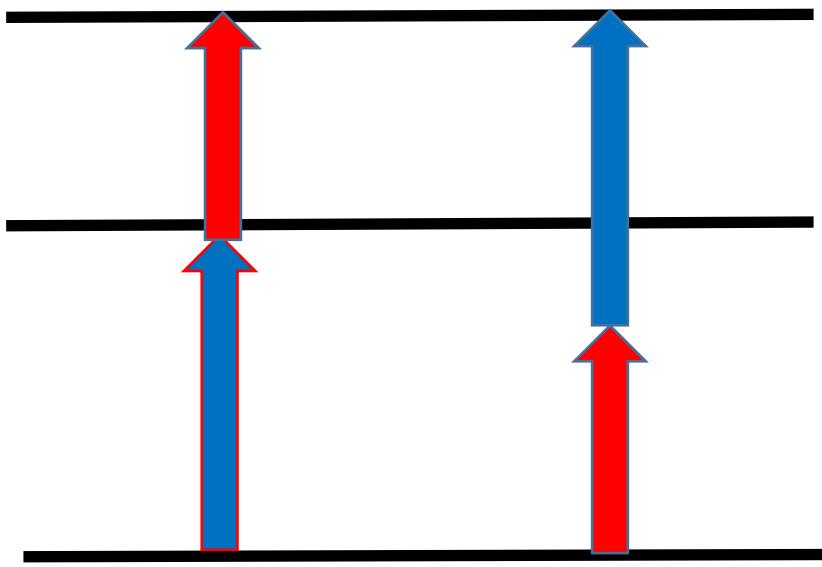
$\alpha < 0$ – красный чирп

$\alpha > 0$ – 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

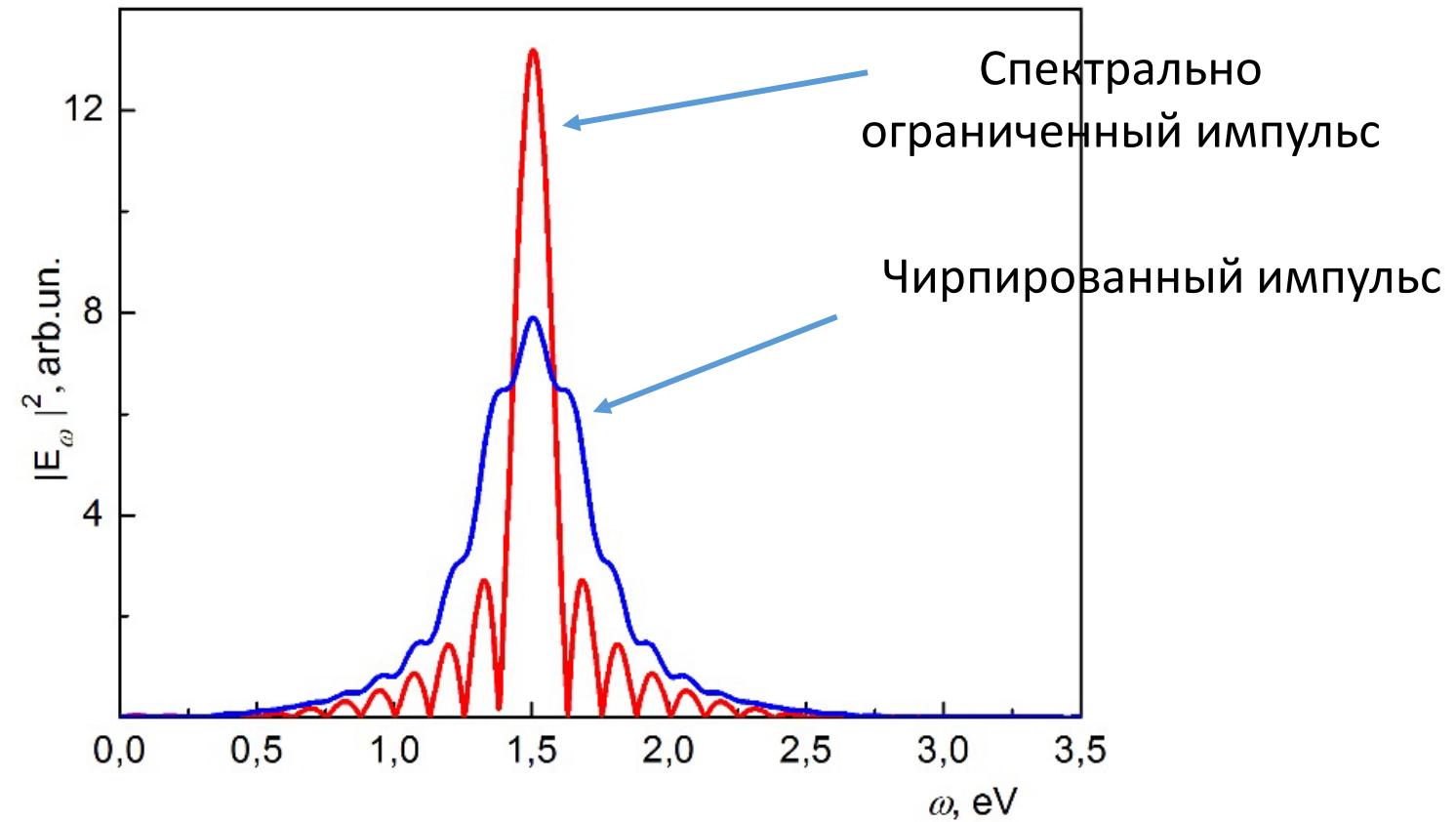


Красный чирп
(частота падает)

эффективное
возбуждение

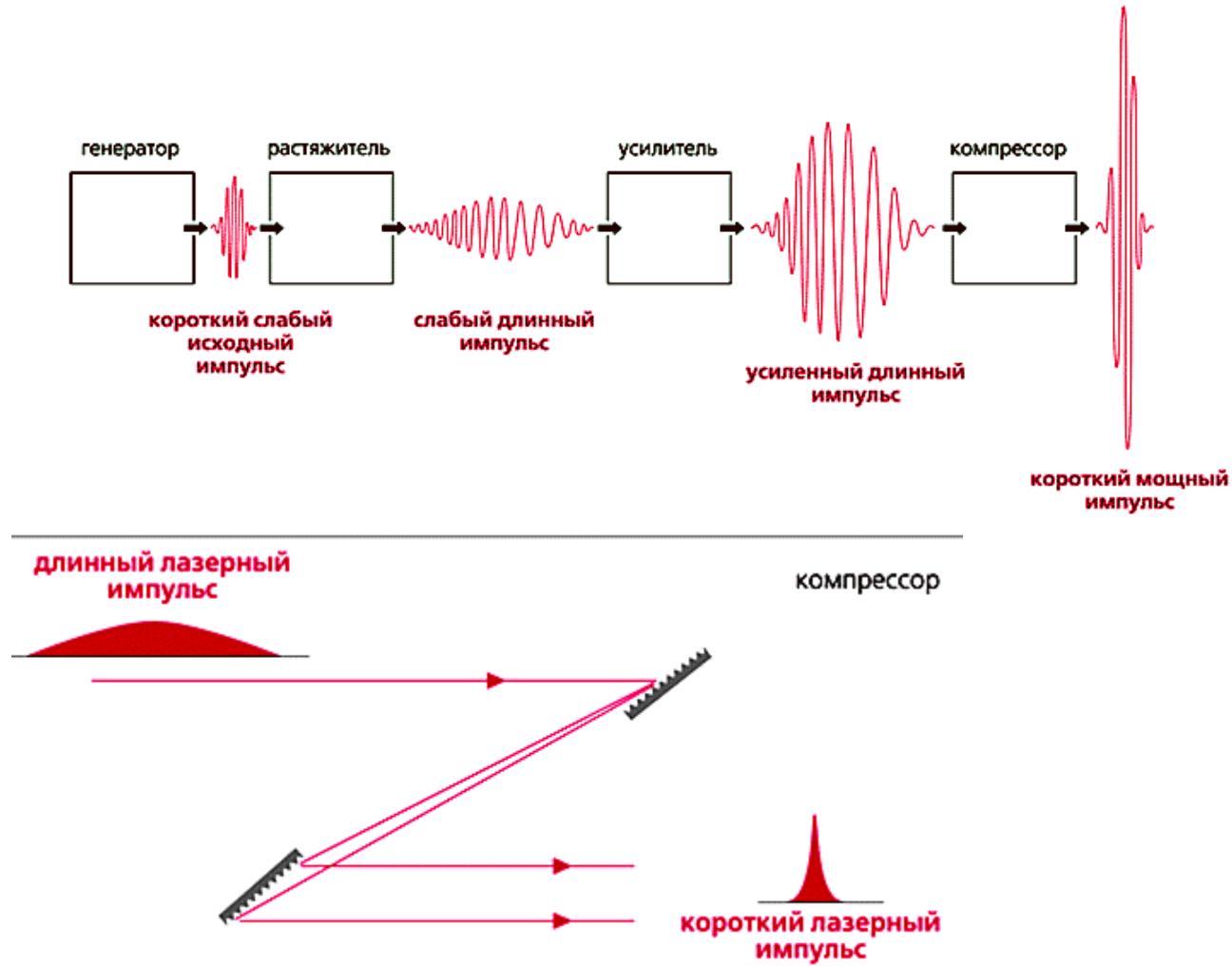
Голубой чирп
(частота растет)

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 $\Delta\phi(t) = \frac{\omega}{c} n_2 I(t)L$

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

предельное сжатие

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

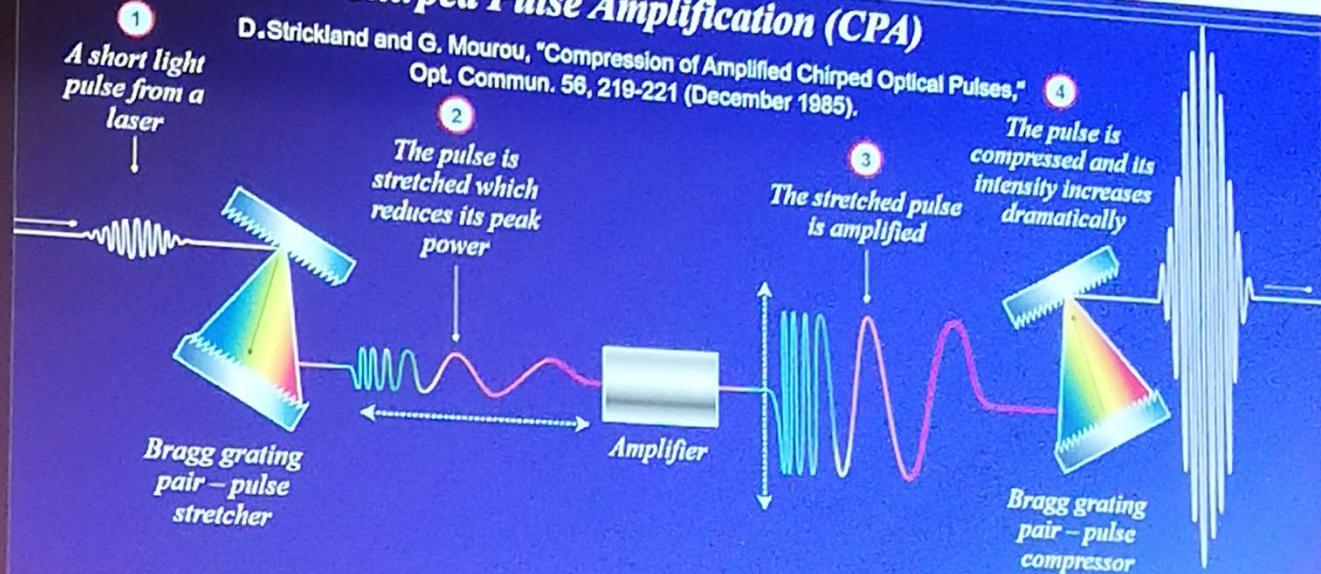
Возможно сжатие импульсов TiSa лазера
вплоть до одного периода колебаний ~2 фс

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»

44th 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 Крауз (Ferenc Krausz), Пьер Агостиани (Pierre Agostini)



High Field Attosecond Physics, 2005
Obergurgl, Austria

Laser Physics Workshop, 2009,
Barcelona, Spain

ATTO-2013, Paris, France

Генерация аттосекундных импульсов

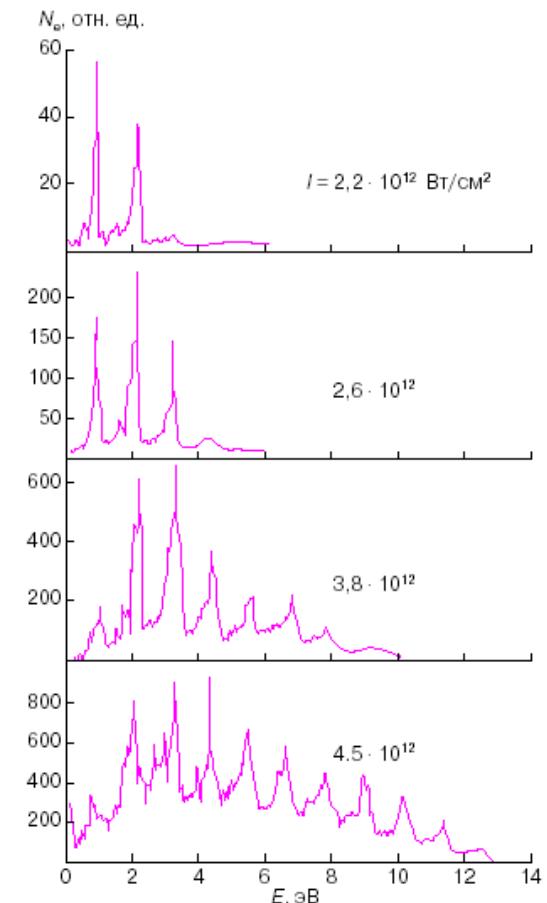
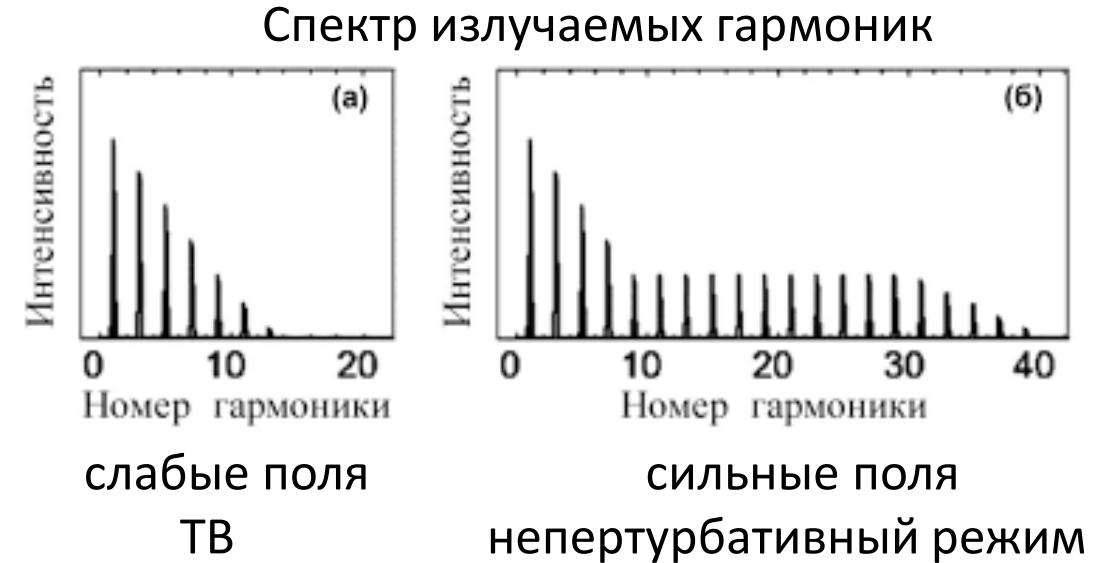
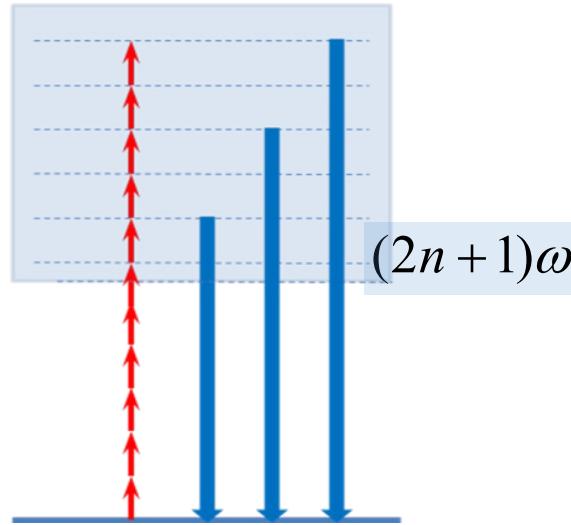
Многоквантовый фотоэффект (Н.Б. Делоне, 1964) и надпороговая ионизация атомов (R. Agostini, 1979)

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

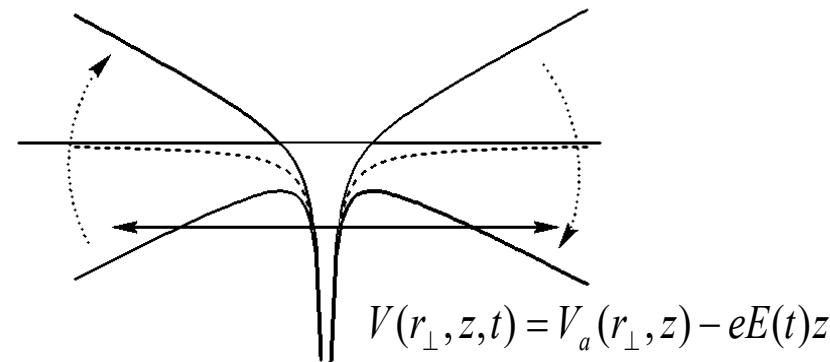
Ионизация атомов ксенона излучением Nd лазера ($\lambda=1064$ нм $\hbar\omega = 1.17$ эВ) с интенсивностью $10^{12} - 10^{13}$ Вт/см². 11-квантовый фотоэффект.

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

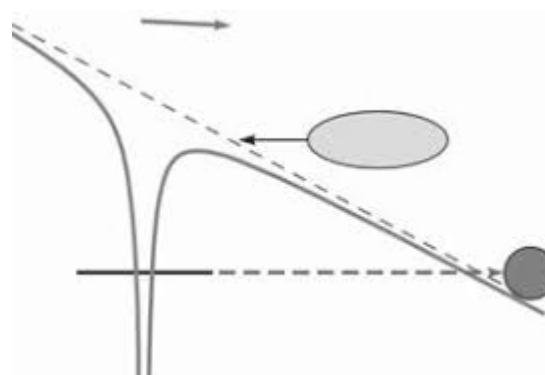


Генерация аттосекундных импульсов в лазерной плазме

Пространственно – временная картина процесса

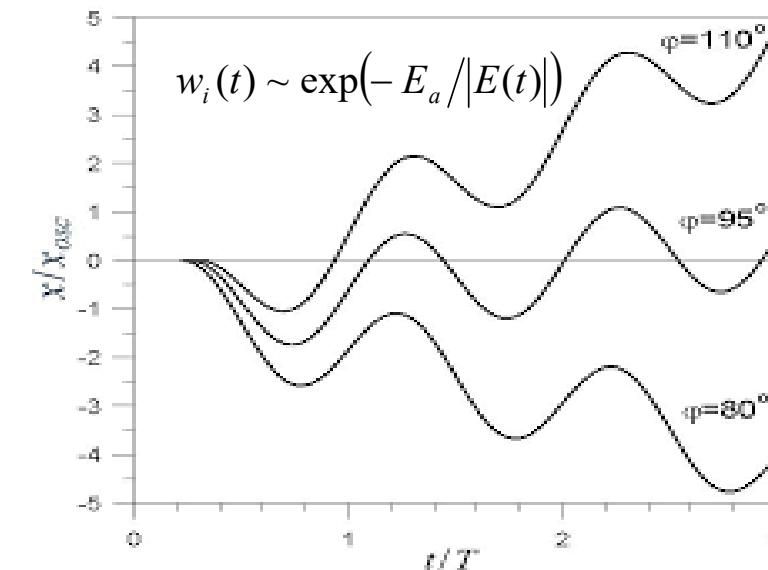


Атомный потенциал при наличии сильного лазерного поля



Эффект перерассеяния
(R. Corkum, 1993)

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



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

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

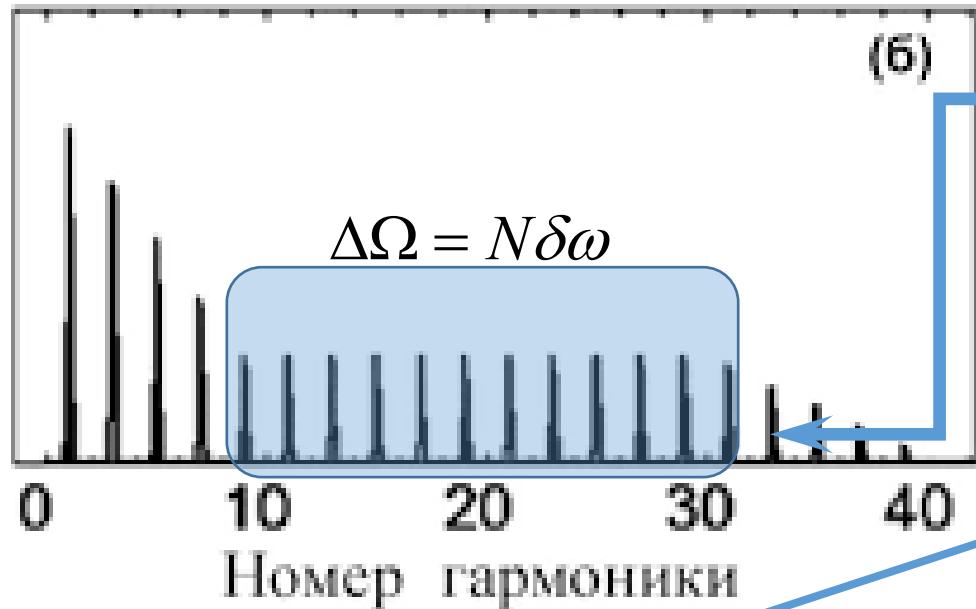
Теория фотоионизации Келдыша (1964)

Переход из связанного начального состояния в волковский континуум в поле волны:
Низкие частоты – туннельный эффект,
Высокие частоты – многоквантовый фотоэффект

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

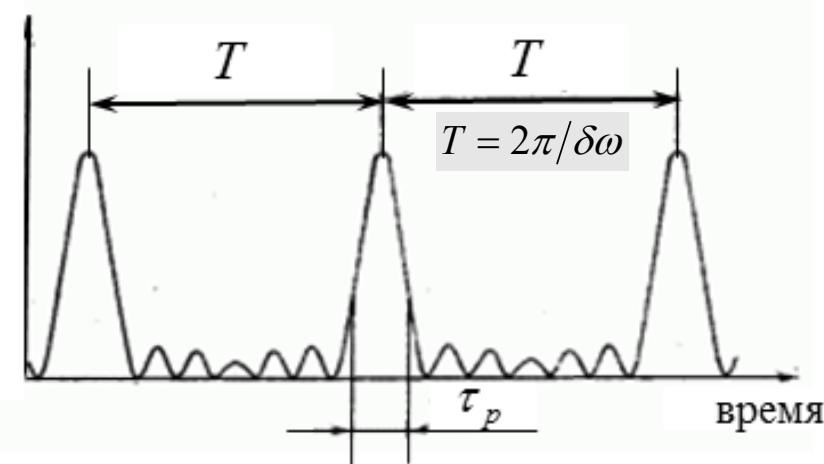
Генерация аттосекундных импульсов

Интенсивность



Полагаем, что во всех модах напряженность поля и фаза одинаковы

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



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

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

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/см² (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/см², Мичиганский университет.

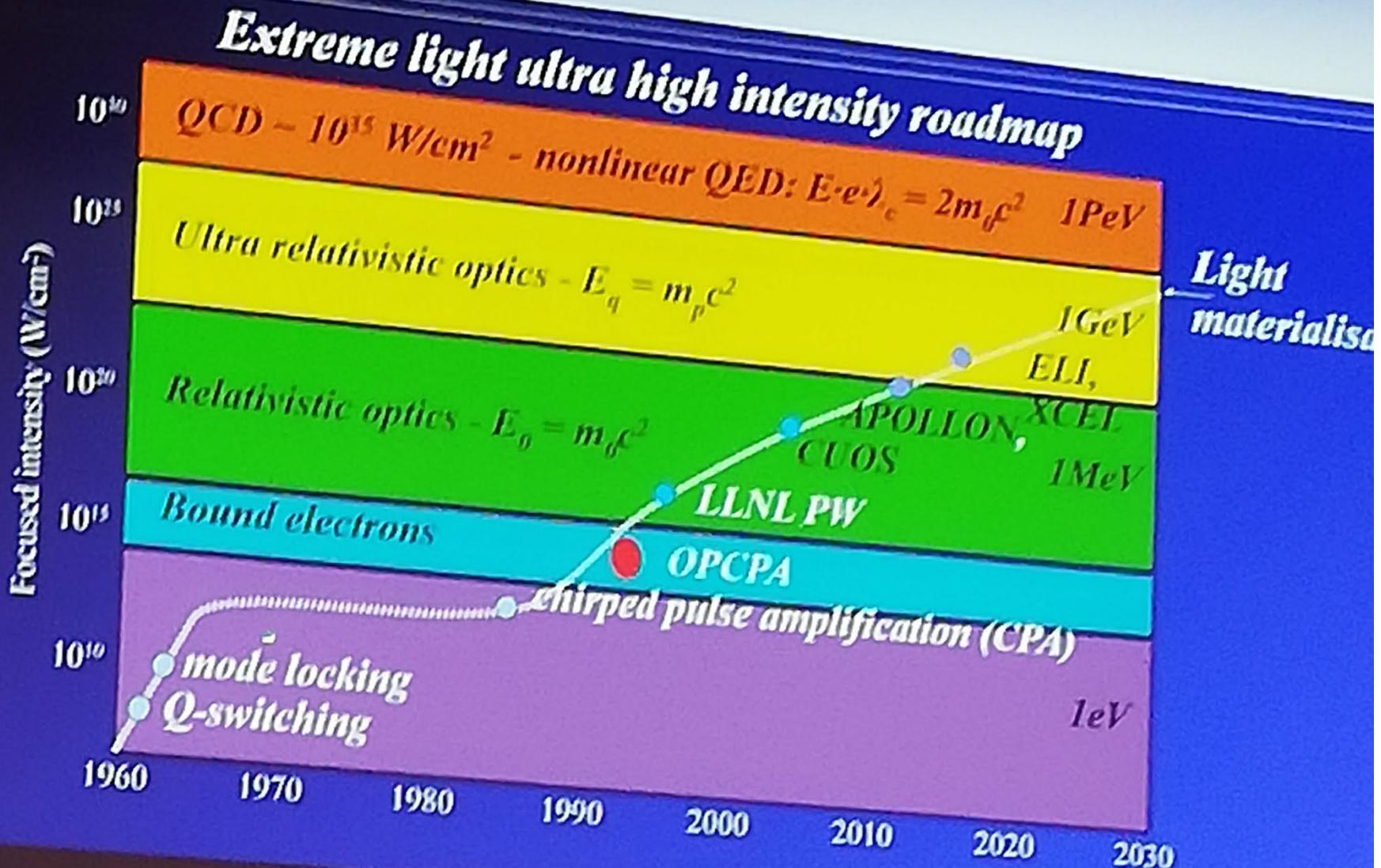
Длительность импульса ~ 20 ас (2017)

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!

