



МГУ им.М.В.Ломоносова
Физический факультет и МЛЦ



Андреев Анатолий Васильевич
Савельев Андрей Борисович
Экстремальные световые
поля: генерация и некоторые
применения

Третьи Черенковские чтения «Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц», Москва, ФИАН, 6 апреля 2010 г.

План доклада

- *Экстремальные световые поля: шкала интенсивностей*
- *Генерация экстремальных световых полей*
- *Ядерная физика «в пробирке»*
- *Возбуждение низколежащих ядерных уровней и новые подходы к проблеме гамма-лазера*

*Экстремальные световые поля:
шкала интенсивностей*

Field strength in non-linear optics

Coulomb field strength in Hydrogen atom (atomic field):

$$E_a \sim \frac{e}{a^2} \sim 5 \cdot 10^9 \text{ V/cm} = 2 \times 10^7 \text{ SGSE}$$

Non-linear optical susceptibility:

$$\chi^{(2)} = \frac{\kappa}{E} \quad \kappa \approx 0.1 \quad \Rightarrow \quad \chi^{(2)} \approx 5 \times 10^{-9} \text{ SGSE}$$

$$\chi^{(3)} = \frac{\kappa}{E^2} \quad \Rightarrow \quad \chi^{(3)} \approx 2.5 \times 10^{-16} \text{ SGSE}$$

Ultraintense laser fields

Field ionization (multiphoton, tunnel, etc.):

$$\gamma^2 = \frac{2J}{E^2 / \omega^2} \propto \frac{J}{\varepsilon_{osc}} \quad I > 10^{13} \text{ W/cm}^2$$

$\gamma \gg 1$ multiphoton

$\gamma \ll 1$ tunnel, ATI, BSI

Field strength comparable to atomic field:

$$E \sim E_a \sim \frac{e}{a^2} \sim 5 \cdot 10^9 \text{ V/cm}$$

Ultraintense laser field:

$$I_u = \frac{cE_a^2}{8\pi} \sim 3,4 \cdot 10^{16} \text{ W/cm}^2$$

Relativistic optical field

Quiver electron velocity (classical):

$$m_e \ddot{x} = qE e^{i\omega t}$$

$$v_{osc} = \frac{qE}{m_e \omega} \approx c$$

Relativistic “threshold”

$$\mathcal{E}_{osc} \approx 0.5 \text{ MeV}$$

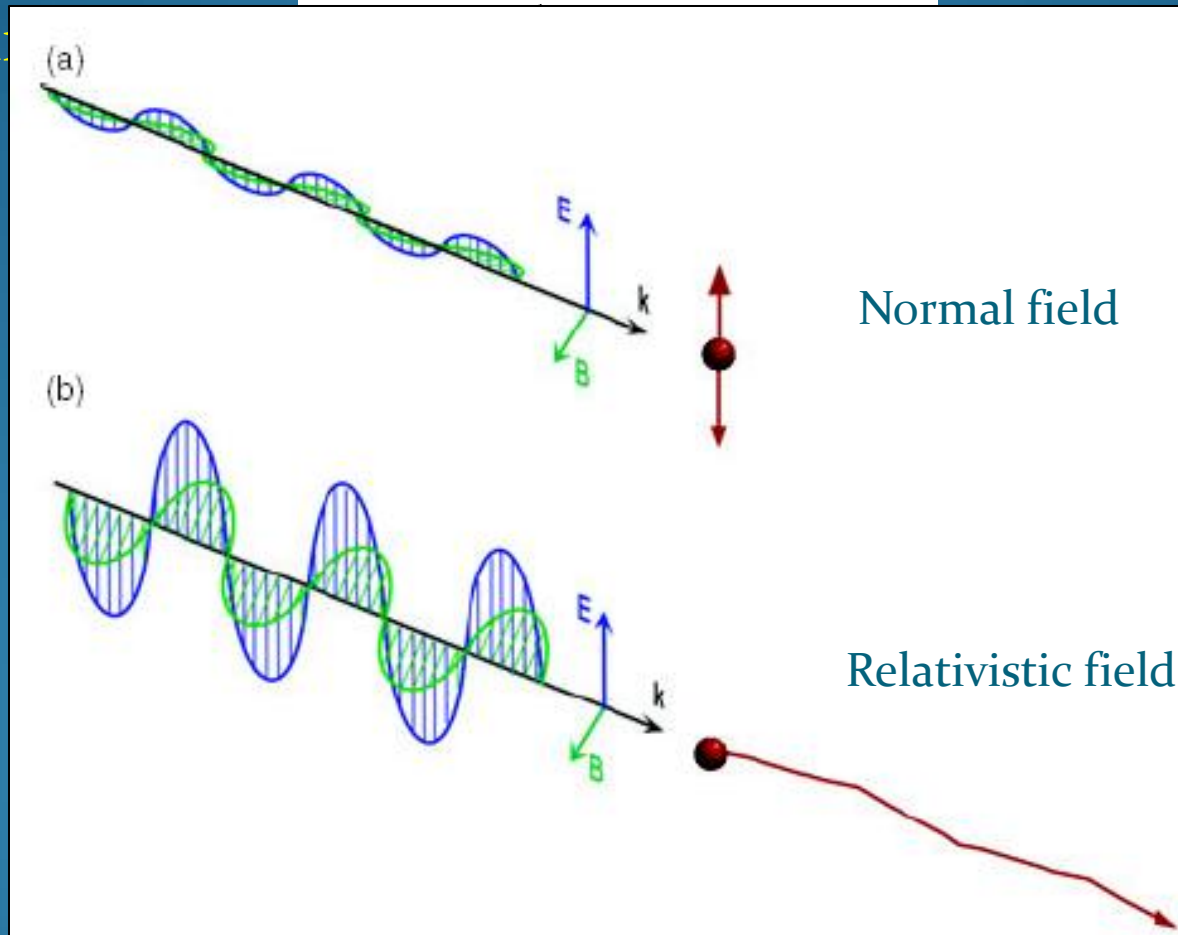
$$\mathcal{E}_{osc} = \frac{q^2 E^2}{2m_e \omega^2} = \frac{q^2 I \lambda^2}{\pi m_e c^3}$$

$$Q = I \lambda^2$$

$$Q_R \approx 1,4 \cdot 10^{18} \text{ W/cm}^2 \mu\text{m}^2$$

Electron motion

Non-linear



Ultrarelativistic or Extreme Optical Field

Relativistic ions:

$$v^{(i)}_{osc} = \frac{eE}{M_i \omega} \approx c$$

$$I^{(proton)}_{rel} \approx 10^{24} \text{ W/cm}^2 \cdot \mu\text{m}^2$$

Schwinger field (vacuum breakdown):

$$eE_{schw} \lambda_c > 2m_e c^2, \quad \lambda_c = \frac{h}{m_e c}$$

$$I_{schw} \approx 10^{29} \text{ W/cm}^2$$

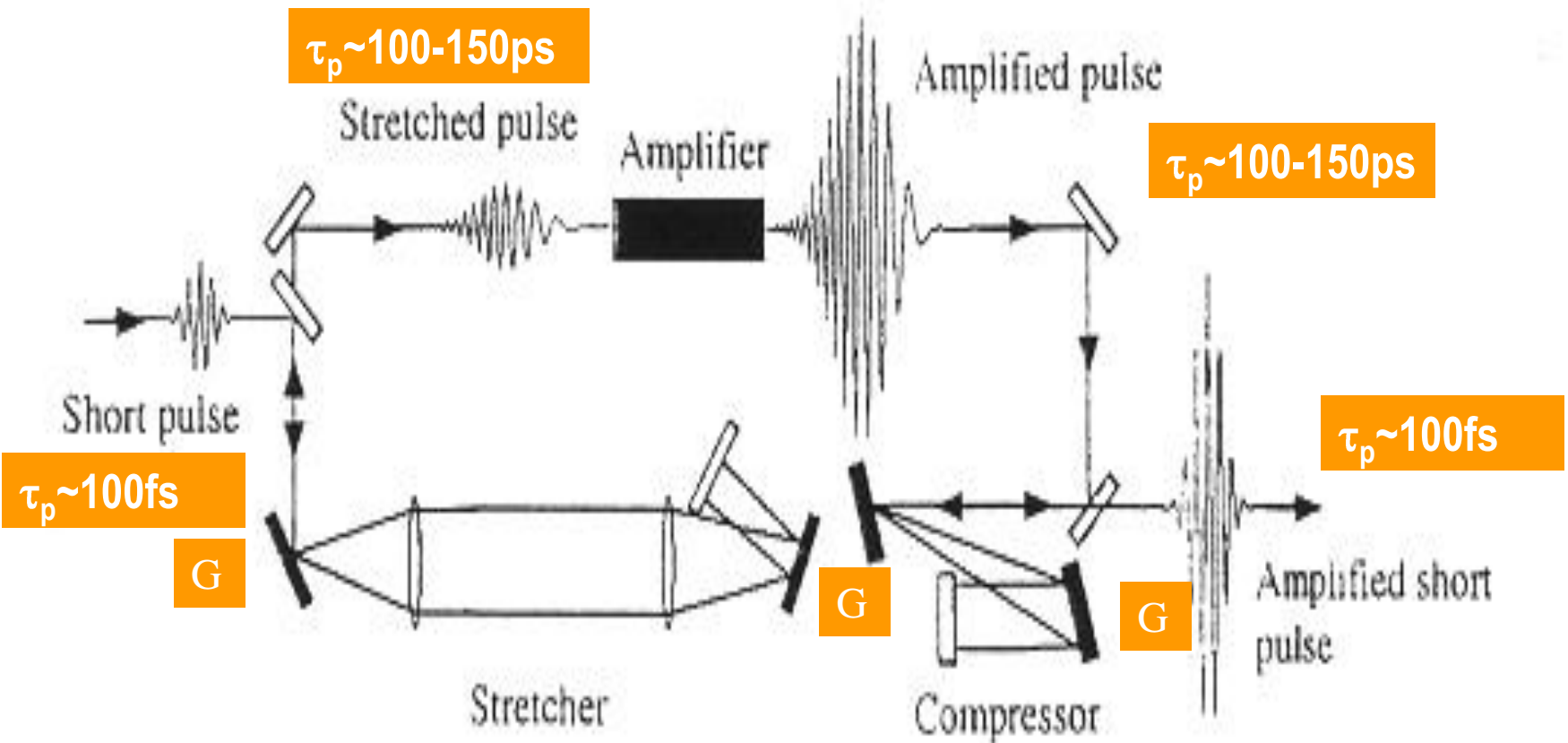
Генерация экстремальных световых полей

$$I = \frac{W}{\tau \cdot S} \quad P = \frac{W}{\tau}$$

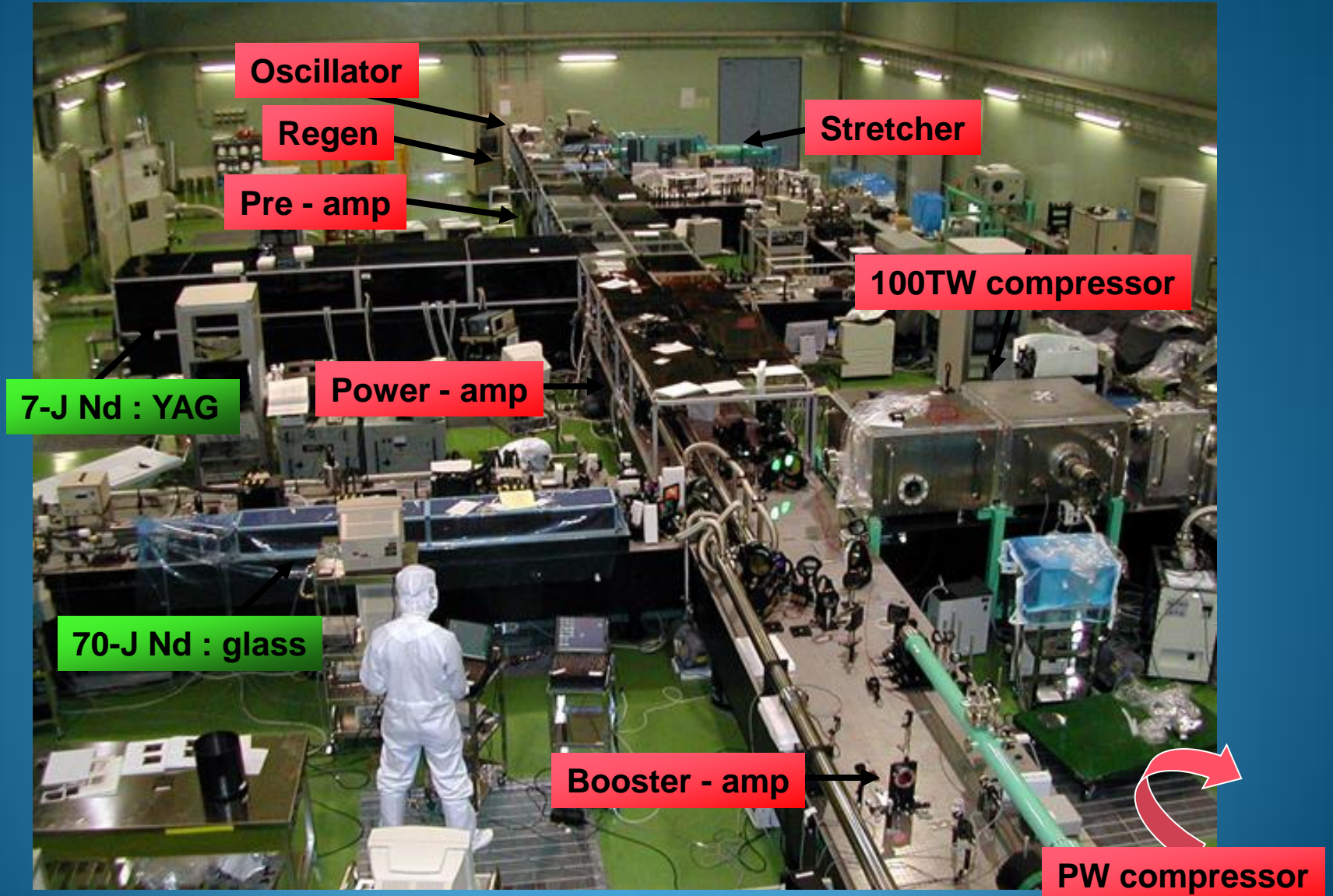
$$\tau \sim 10 \text{ фс} \quad S \approx 1 \text{ мкм}^2 \quad W \approx 1 \text{ Дж}$$

$$I \approx 10^{22} \text{ Вт/см}^2 \quad P \approx 100 \text{ ТВт}$$

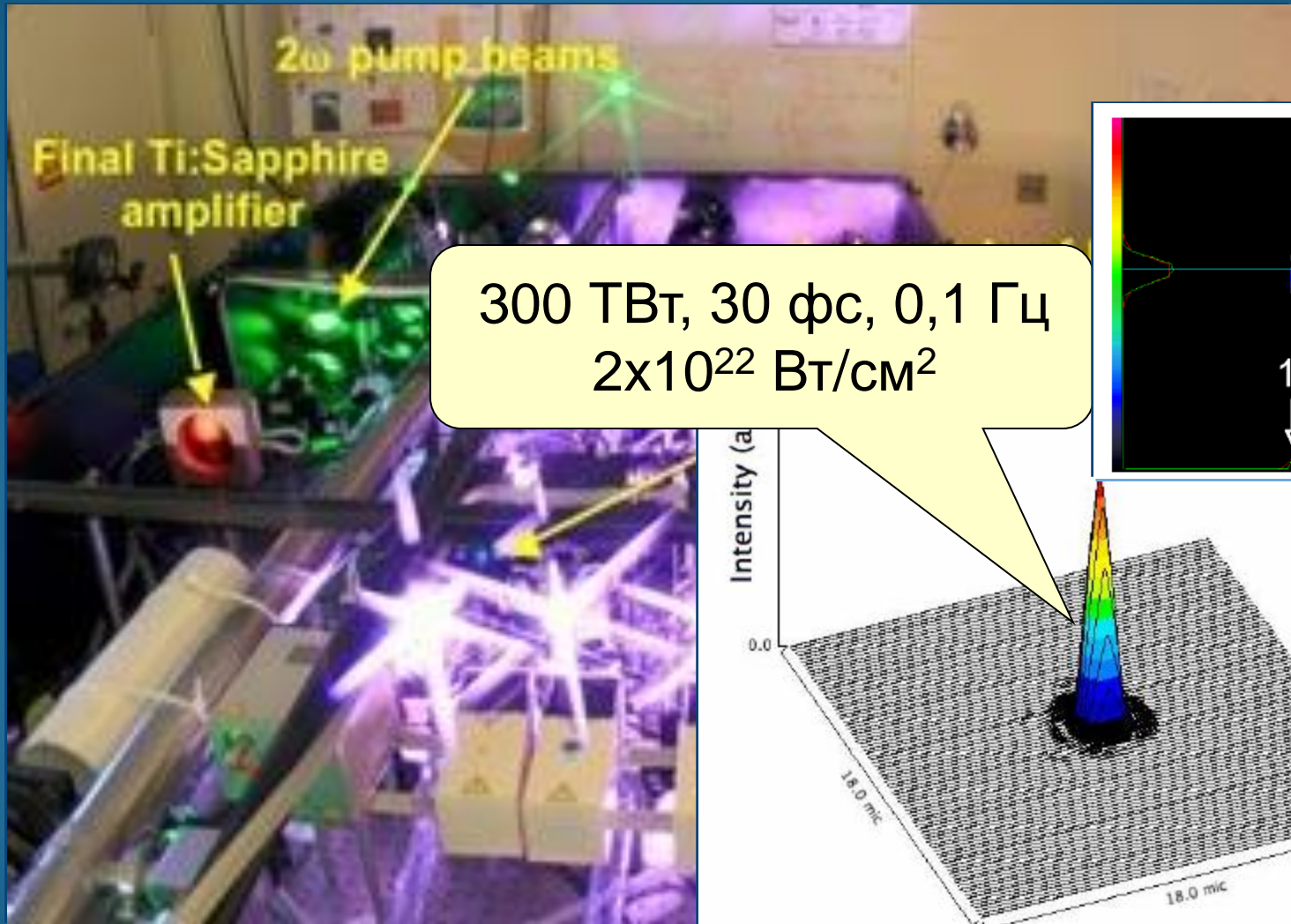
CPA concept



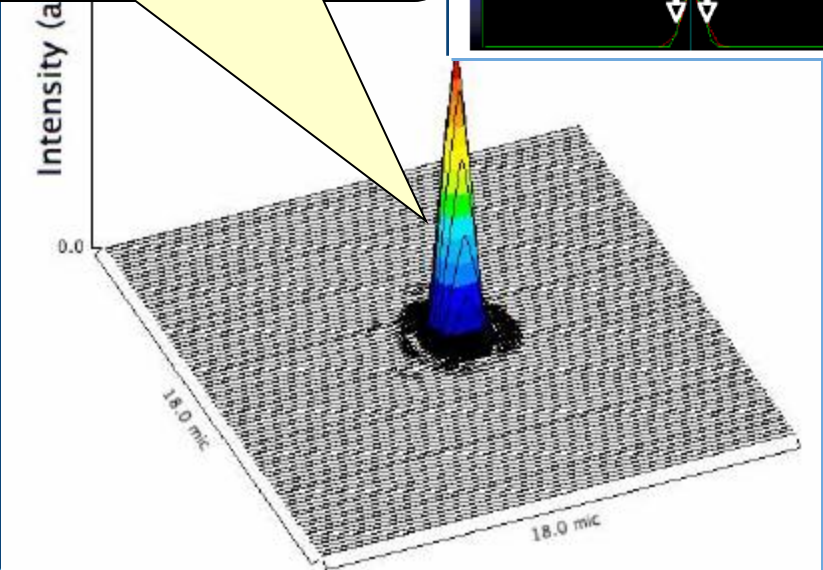
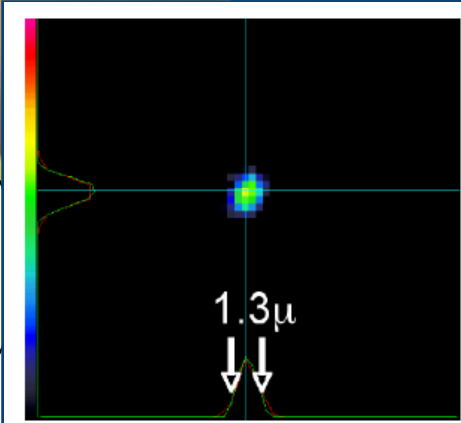
Petawatt Ti:Sa (JAERI-APRC)



Максимальная интенсивность



300 ТВт, 30 фс, 0,1 Гц
 2×10^{22} Вт/см²



Novel approaches

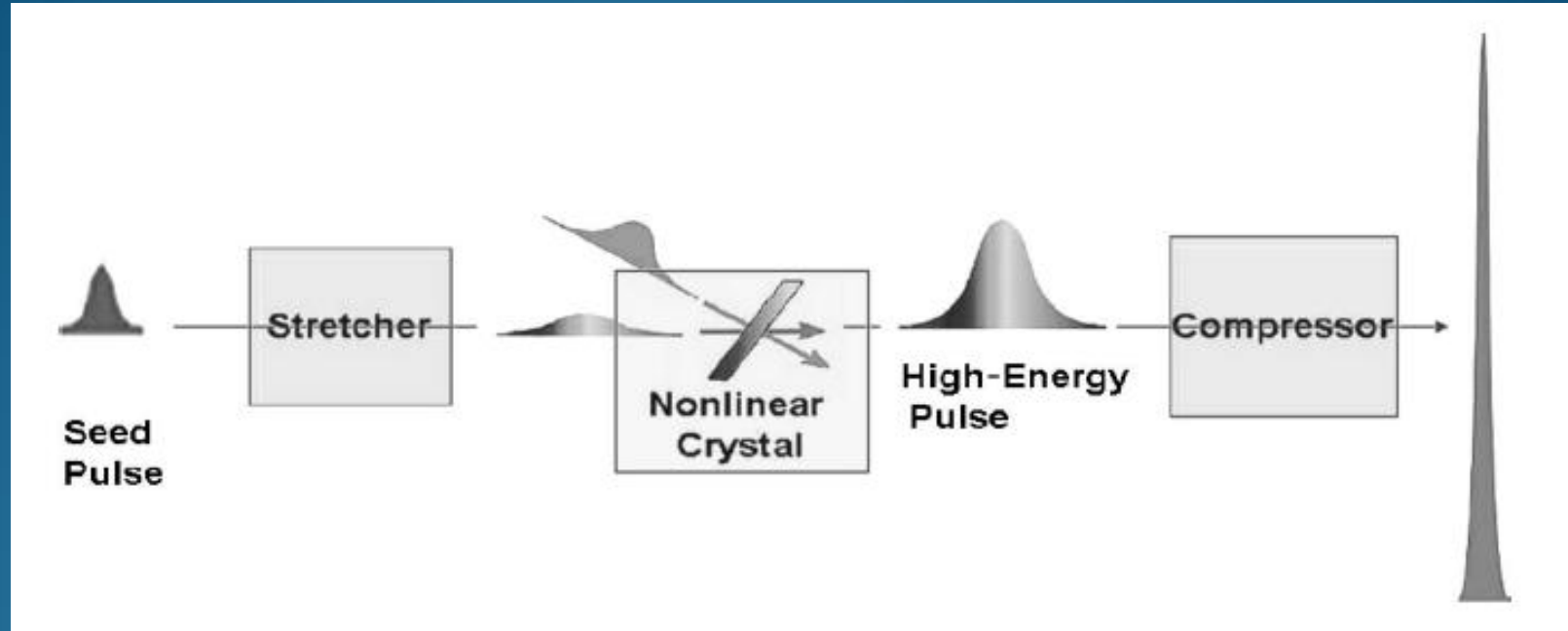
Elements damaging prevents further amplification

- Surface breakdown
- Volume breakdown (self-focusing)

- Increase in size => OPCPA

- Materials with higher damage threshold
=> Plasma amplification

OPCPA



Advantages of OPCPA :

- broad gain bandwidth
- high aperture
- considerable decrease in thermal loading
- significantly lower level of ASE
- very high gain

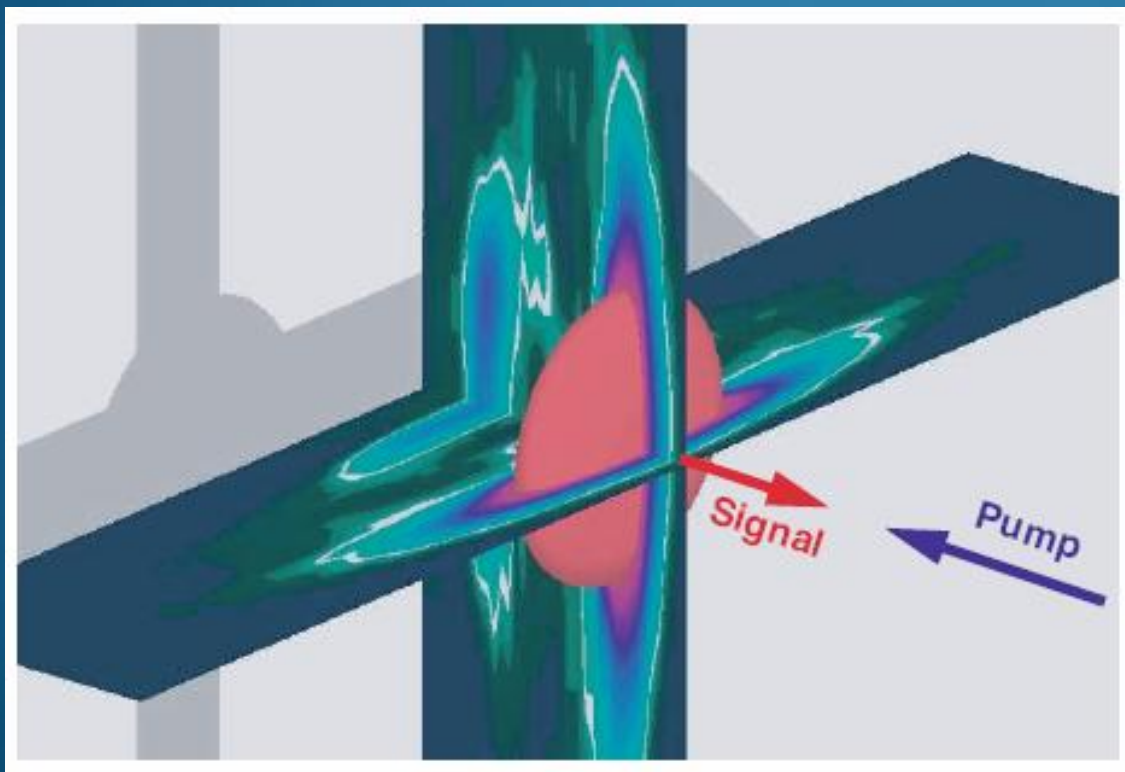


Plasma amplification & shortening

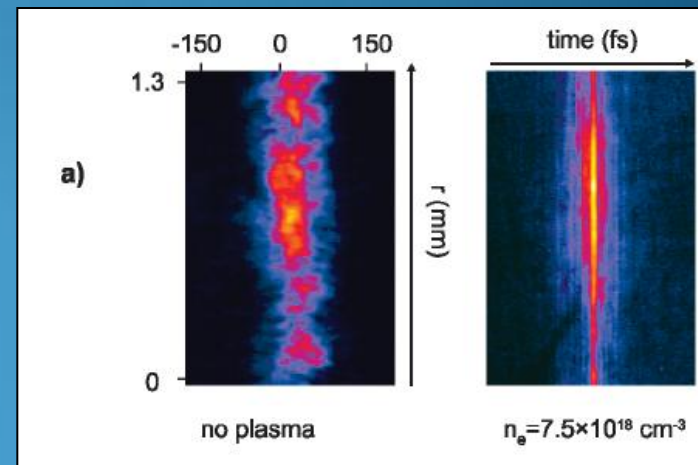
Pump: 12 ps, 1000 nm, $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$

Seed: 15 fs, 1080 nm, $2 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$

$N_e \sim 6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$



Interaction length 2.5 mm
Amplification 1000
Duration 8 fs



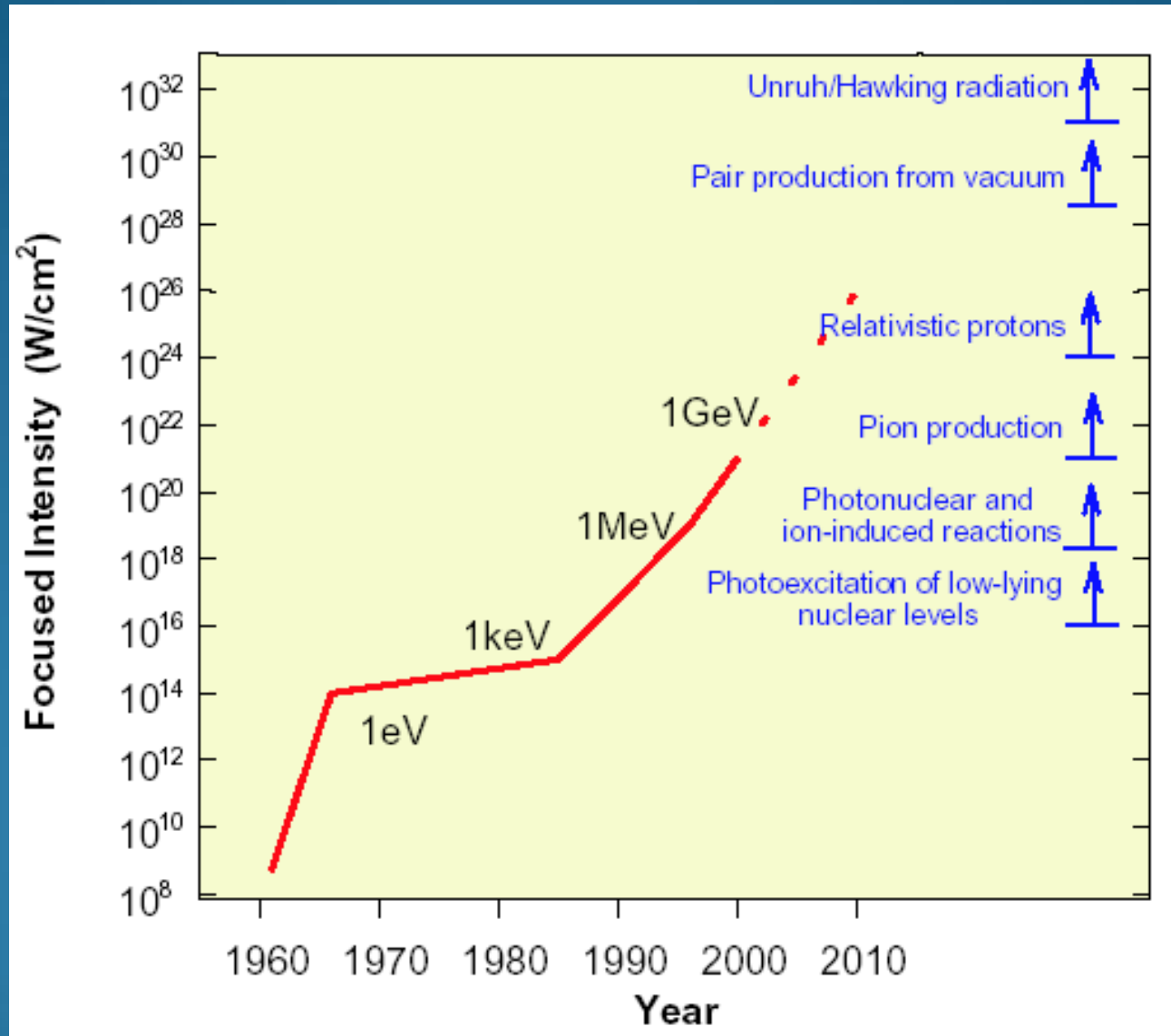
Разрабатываемые лазеры

- Laser-matter interaction at the highest intensity levels (Extreme Light Infrastructure - ELI) 3-4 kJ, 10 fs, 0.2 EW (ExaWatt), $I > 10^{24} \text{ W/cm}^2$
- Thermonuclear research
 - European High Power Laser Energy Research – HiPER 200 kJ in ns pulse + 70 kJ in fs pulse
 - PETAL (forerunner for HiPER project) 3.5 kJ, 0.5 – 10 ps, 5 PW
 - National Ignition Facility, NIF 1.1 MJ in ns pulse
 - Fast Ignition Realization Experiment (FIREX) 4 x 10 kJ, 10 ps
 - РФЯЦ – ВНИИЭФ «ИСКРА-5» 30 kJ, 0.3- ns, «ЛУЧ» 12 kJ, 1-ns, «UFL-900» 900 kJ, 1 ns, PW ОРСРА (совместно с ИПФ РАН)
 - и др.

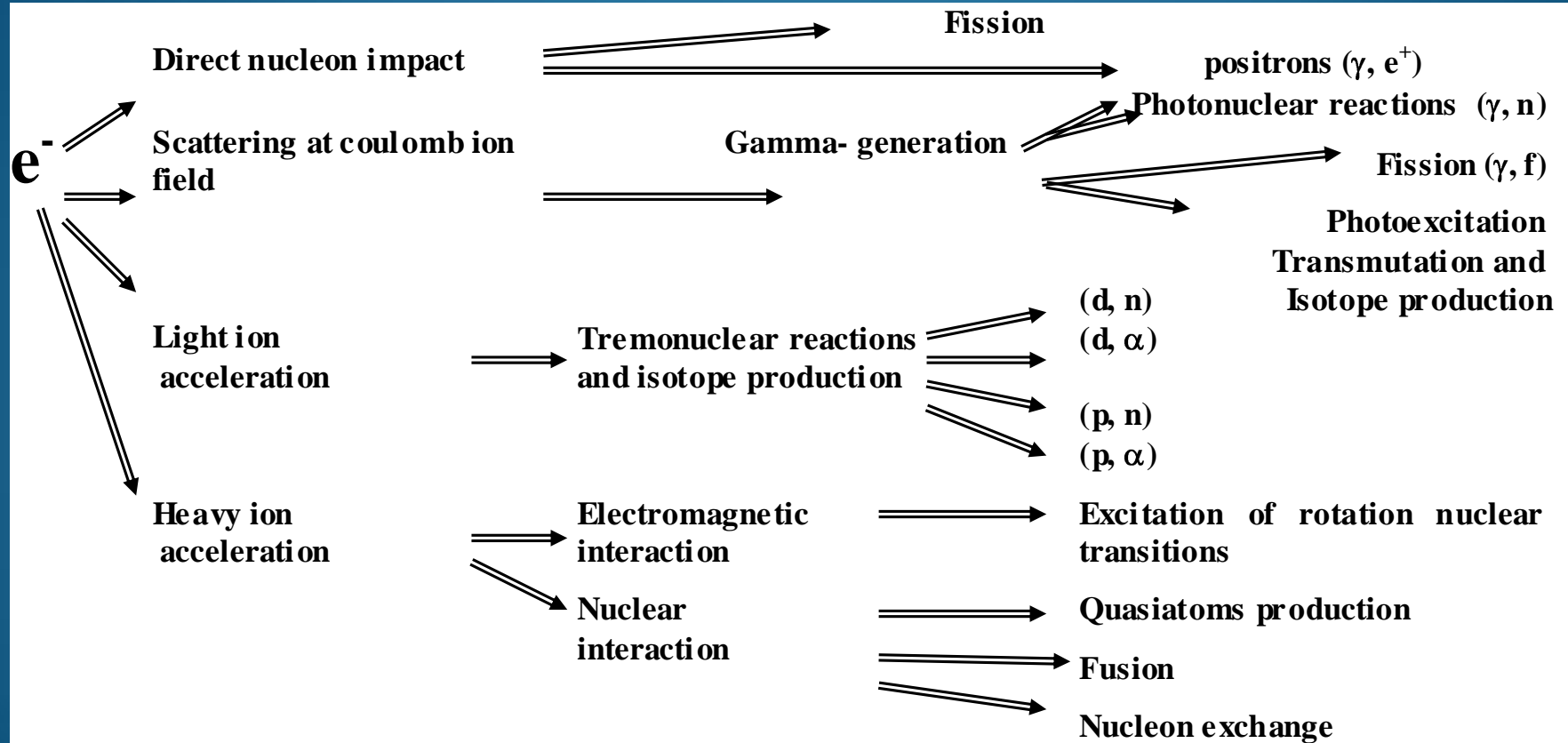
Лазерно-индуцированные ядерные процессы

- ✓ Фотоиндуцированные ядерные реакции
- ✓ Реакции под действием легких ионов
- ✓ Генерация позитронных пучков
- ✓ Наработка легких изотопов
- ✓ Термоядерные реакции
- ✓ Низкоэнергетические ядерные процессы
- ✓ Гамма - лазер

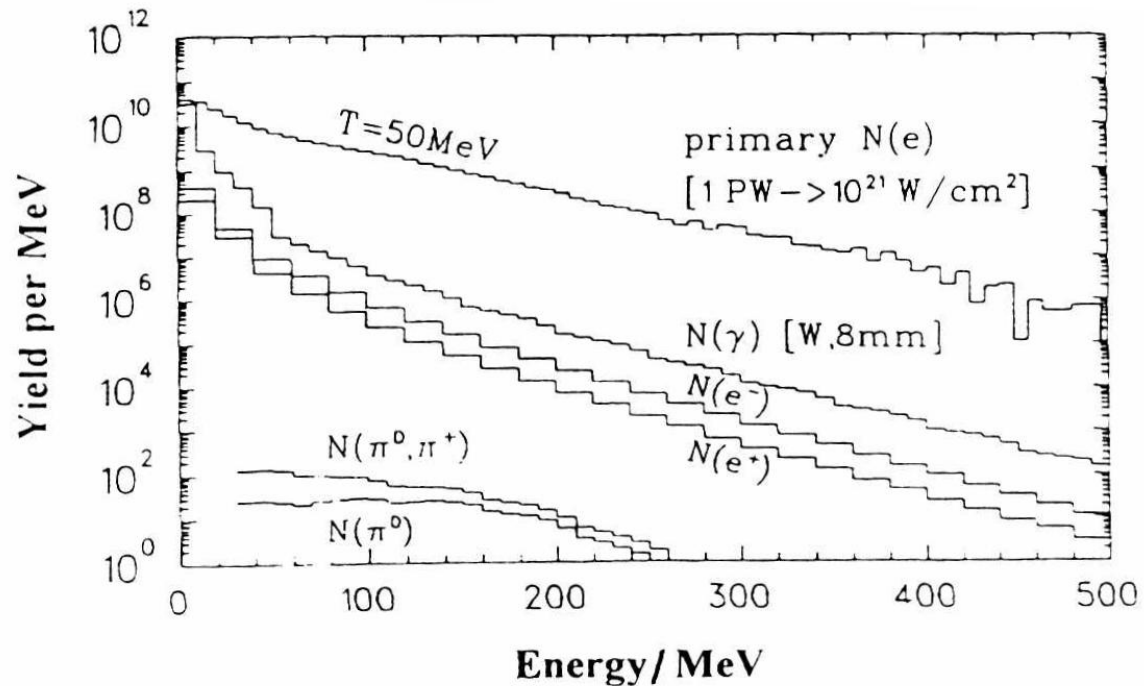
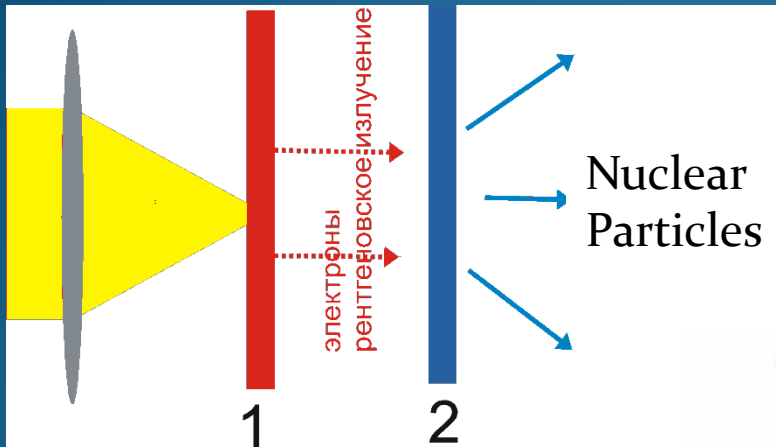
Electron quiver energy



Feasible channels for nuclear reactions



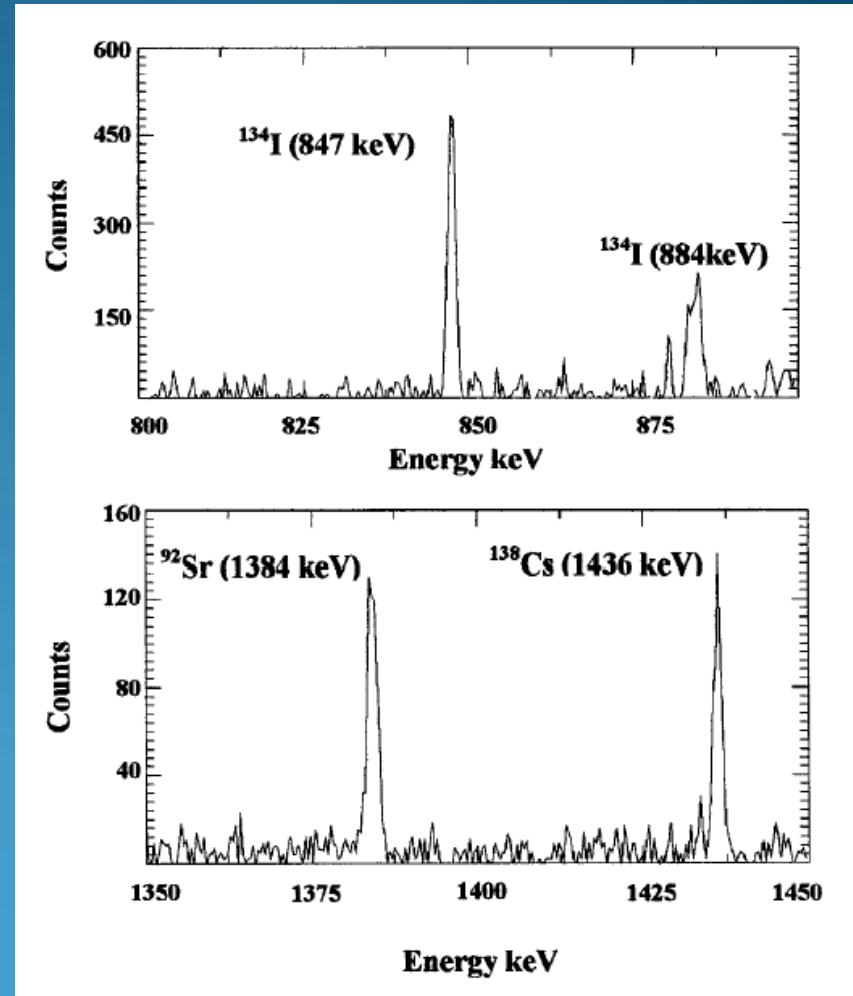
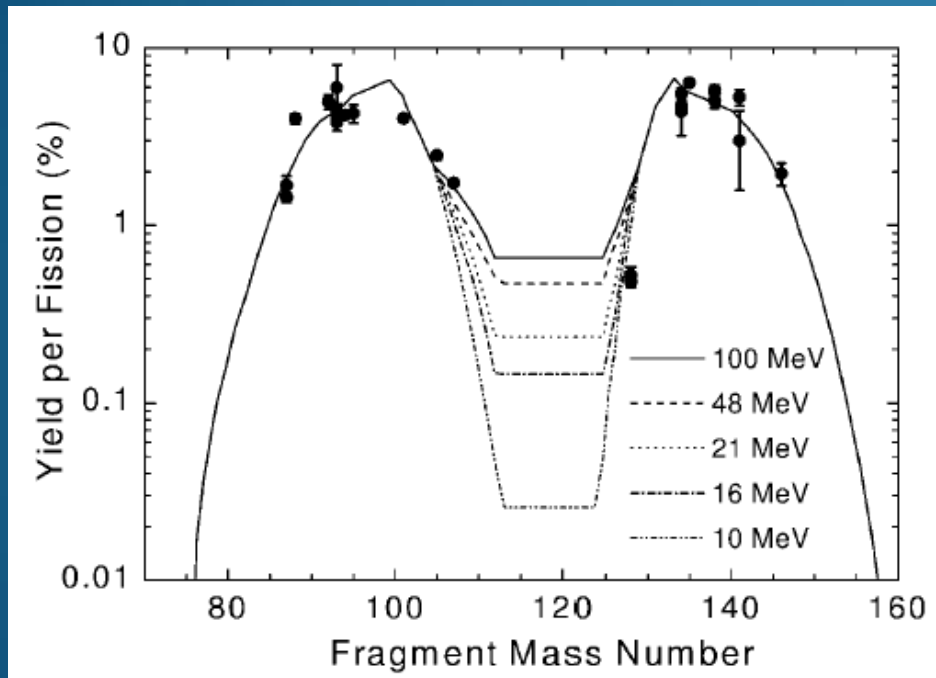
General scheme for plasma induced nuclear reactions



Photoinduced nuclear reactions:



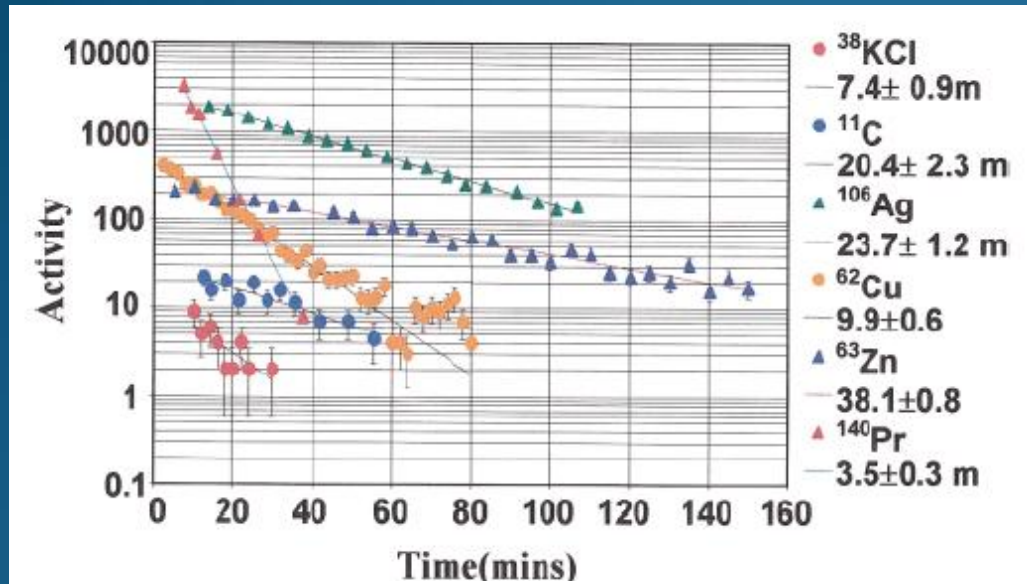
$I \sim 5 \times 10^{19} \text{ W T/cm}^2$, $\tau \sim 1 \text{ ps}$



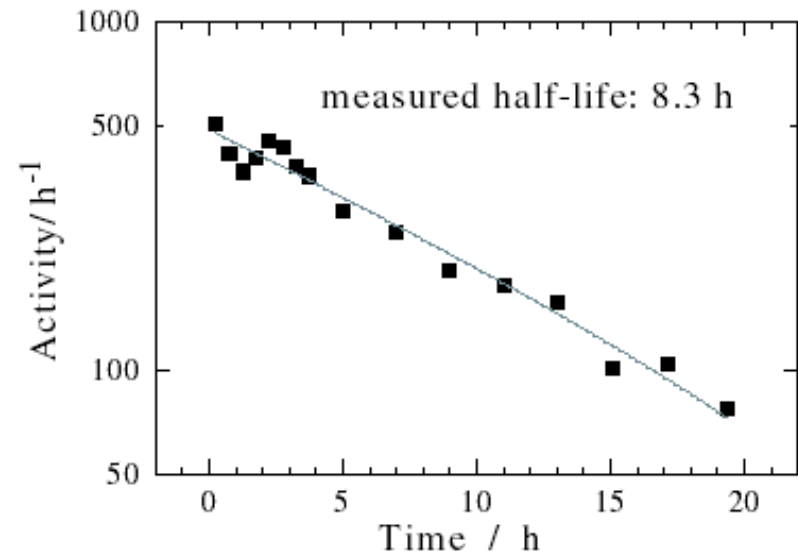
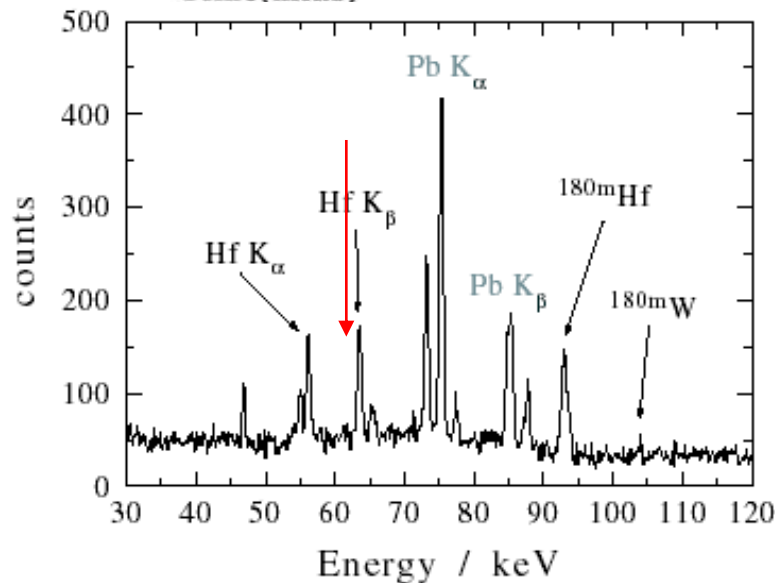
Rutherford: K.W. D. Ledingham, I. Spencer, T. McCanny, et al PR1 84 899 (2000)

LLNL: T. E. Cowan, A.W. Hunt, T.W. Phillips, et al PR1 84 903 (2000)

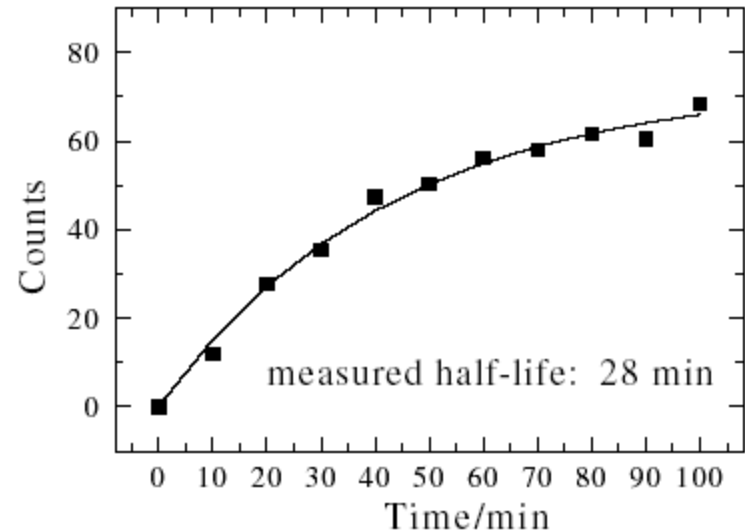
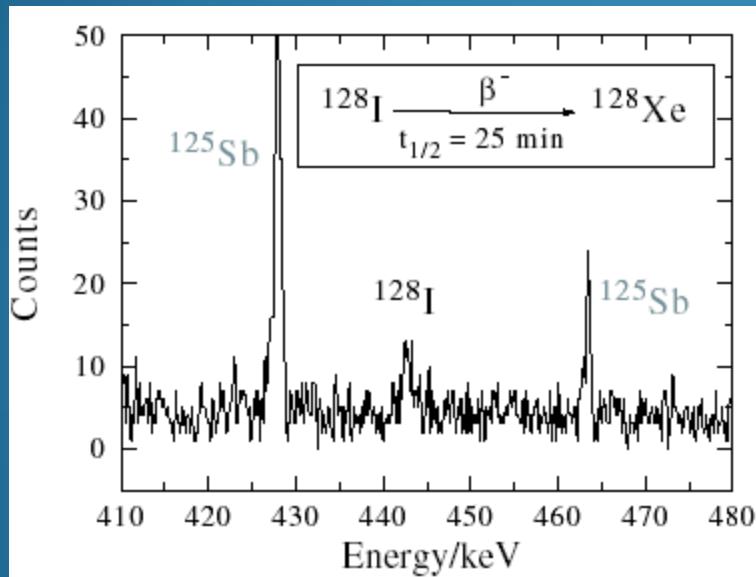
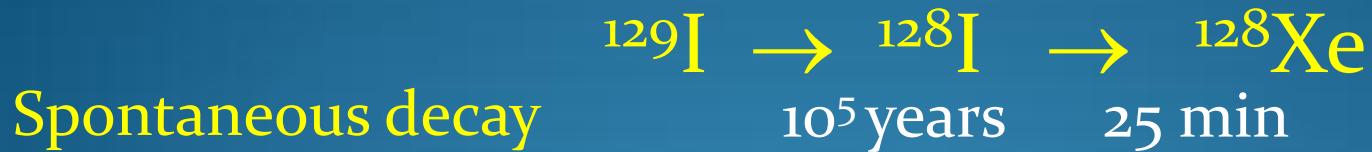
Photoinduced reactions (γ, n) : isotope production



$I \sim 5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2, \tau \sim 1 \text{ ps}$



Isotope transmutation



Positrons

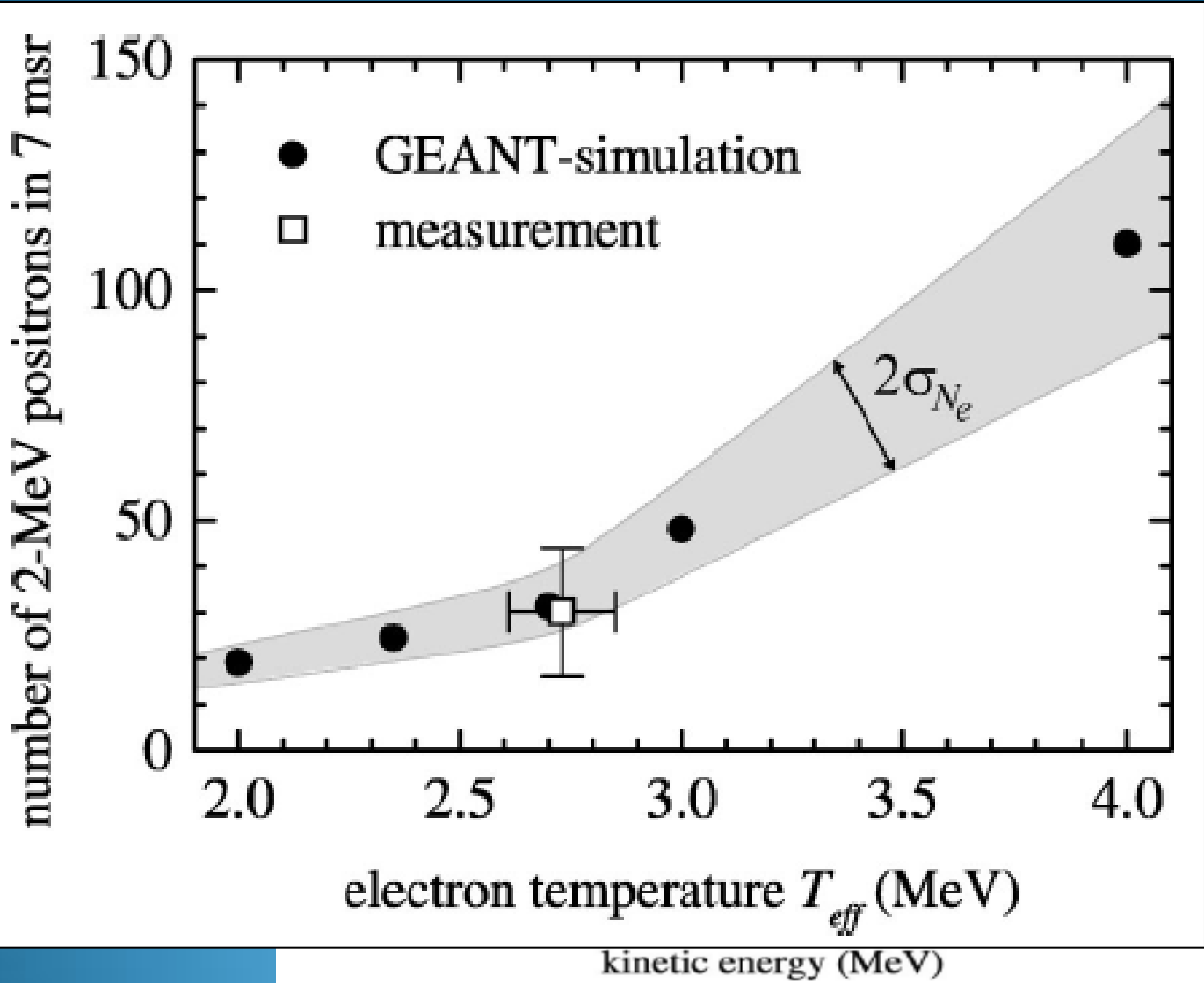
Reaction of
For 5 MeV

$$\dot{n}_{ei} : \dot{n}_{ee} : \dot{n}_{e\pi}$$

$$\sigma_{ei} \approx 1.4 \times 10^{-30} \text{ cm}^2$$

$$(\beta \sim 1) \sim 100$$

$$\sigma_{ei} \approx 10^{-26} \text{ cm}^2$$



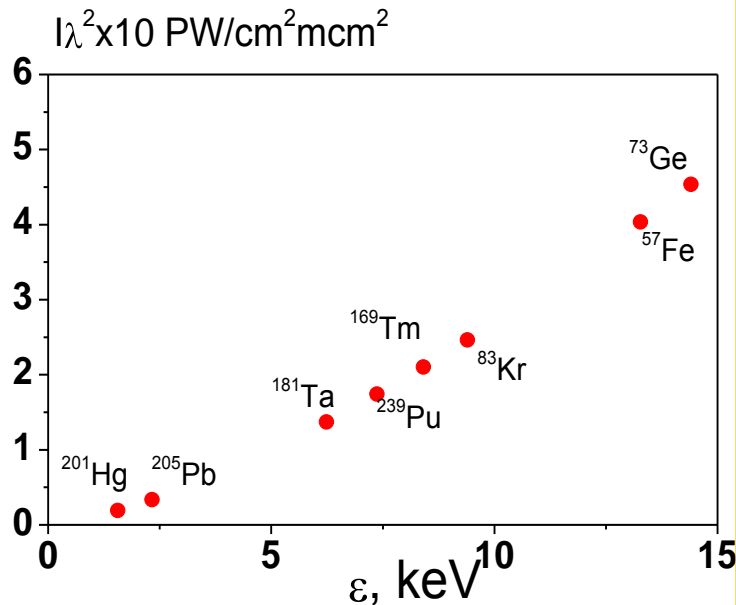
31

positron number / MeV in 4π

Возбуждение низкоэнергетических ядерных состояний

Excitation by plasma emission

$T_{hot} \approx 5 - 20 \text{ keV}$ at intensities above 10^{16} W/cm^2



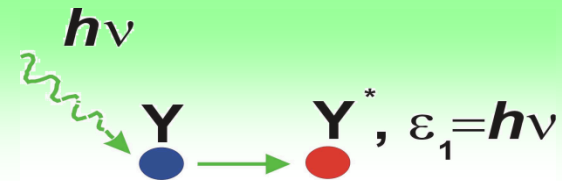
✓ Plasma X-rays

✓ Plasma electrons

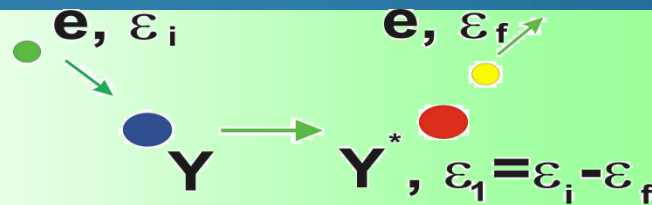
✓ Plasma charged particles

Low energy nuclear isomers excitation: key channels

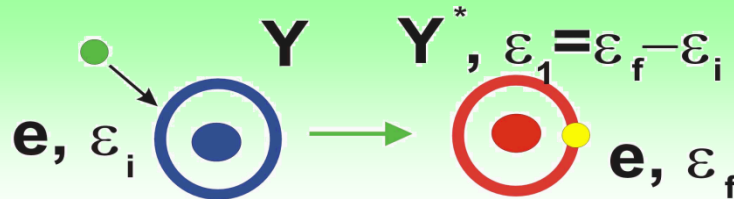
➤ photoexcitation



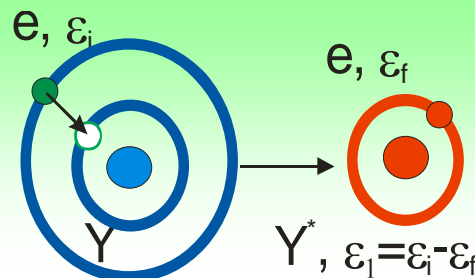
➤ NEES



➤ NEEC



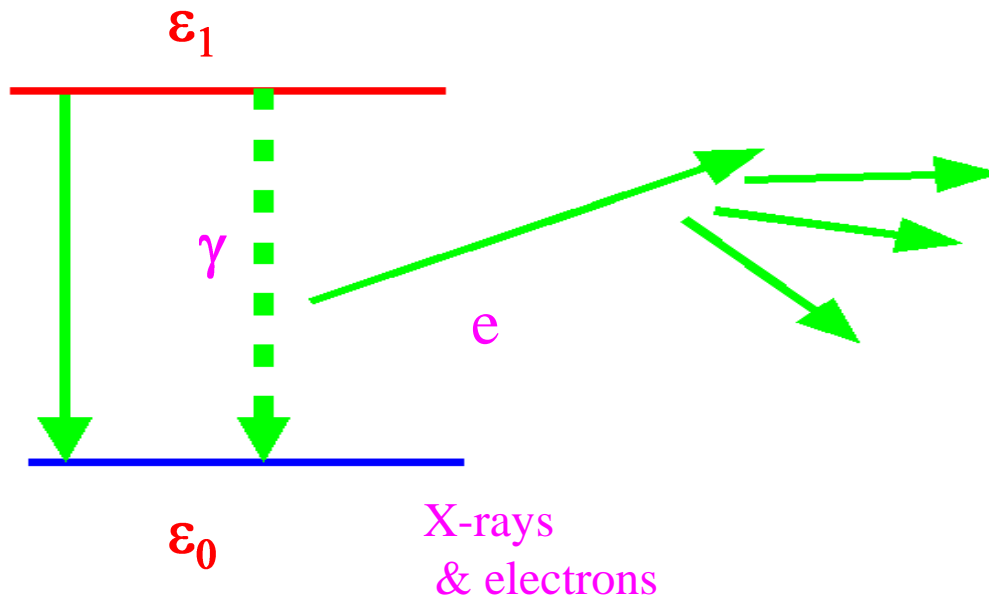
➤ NEET



Low energy nuclear isomer decay

➤ γ -decay

➤ internal electronic conversion (inverse NEEC)



$$\frac{P_{IEC}}{P_\gamma} = \alpha \gg 1;$$

$$T_{full} = \frac{1}{\Gamma_{rad} + \alpha} \gg \tau_p$$

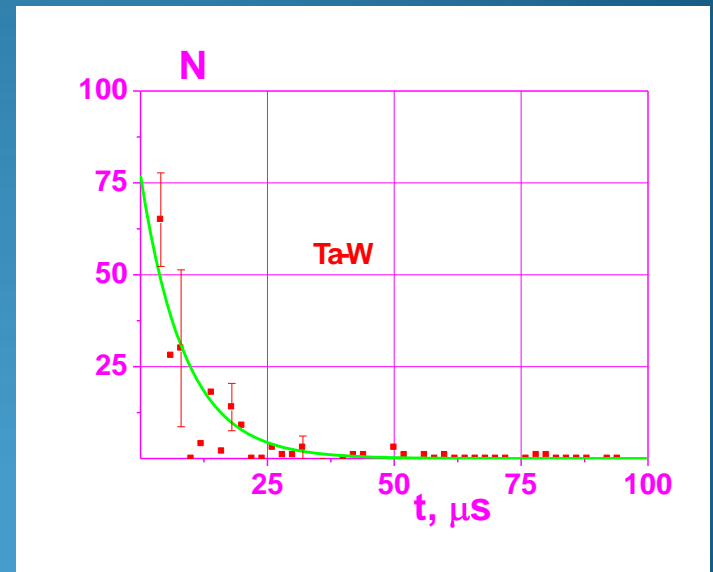
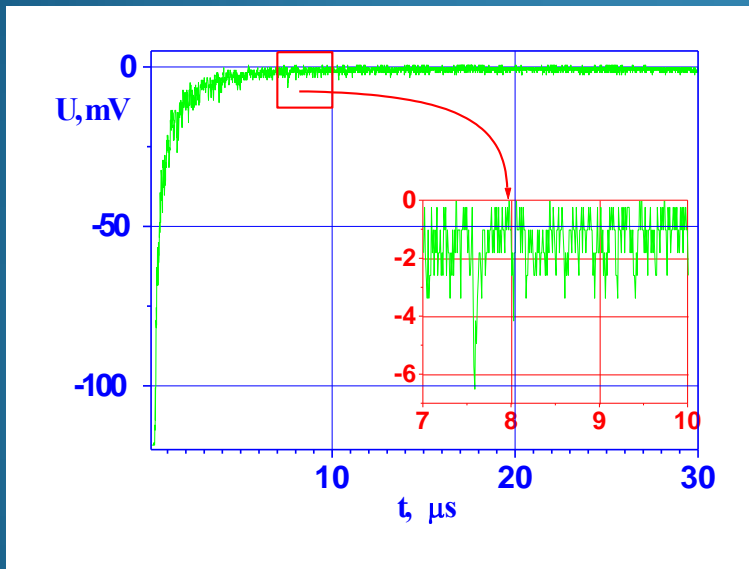
⇒ Detection of a single electrons
at plasma afterglow background

Наблюдение гамма-распада при возбуждении в плазме

Гамма-распад ^{181}Ta

$$I \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ Вт/см}^2$$

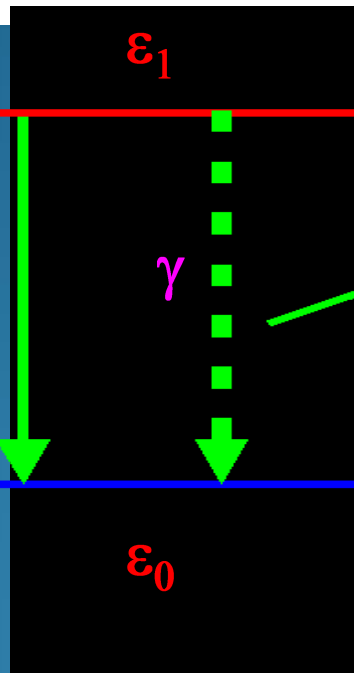
$$N \sim e^{-t/(8.5+2) \text{ мкс}}$$



Low energy nuclear isomer decay

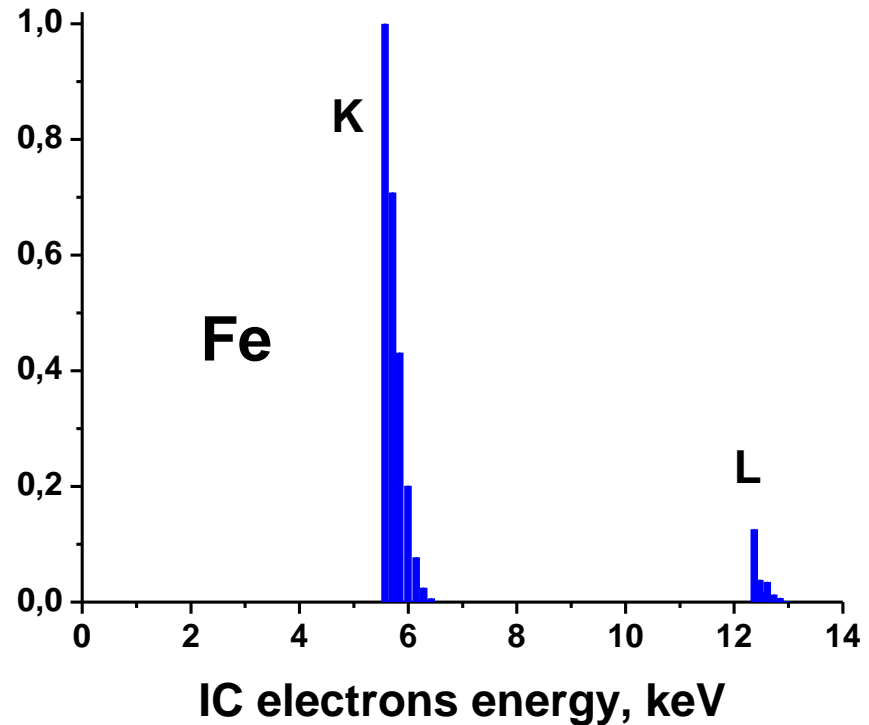
➤ γ -decay

➤ internal electronic conversion (inverse NEEC)



⇒ Detection of a signal at plasma afterglow

Partial IC coefficient



$\gg \tau_p$

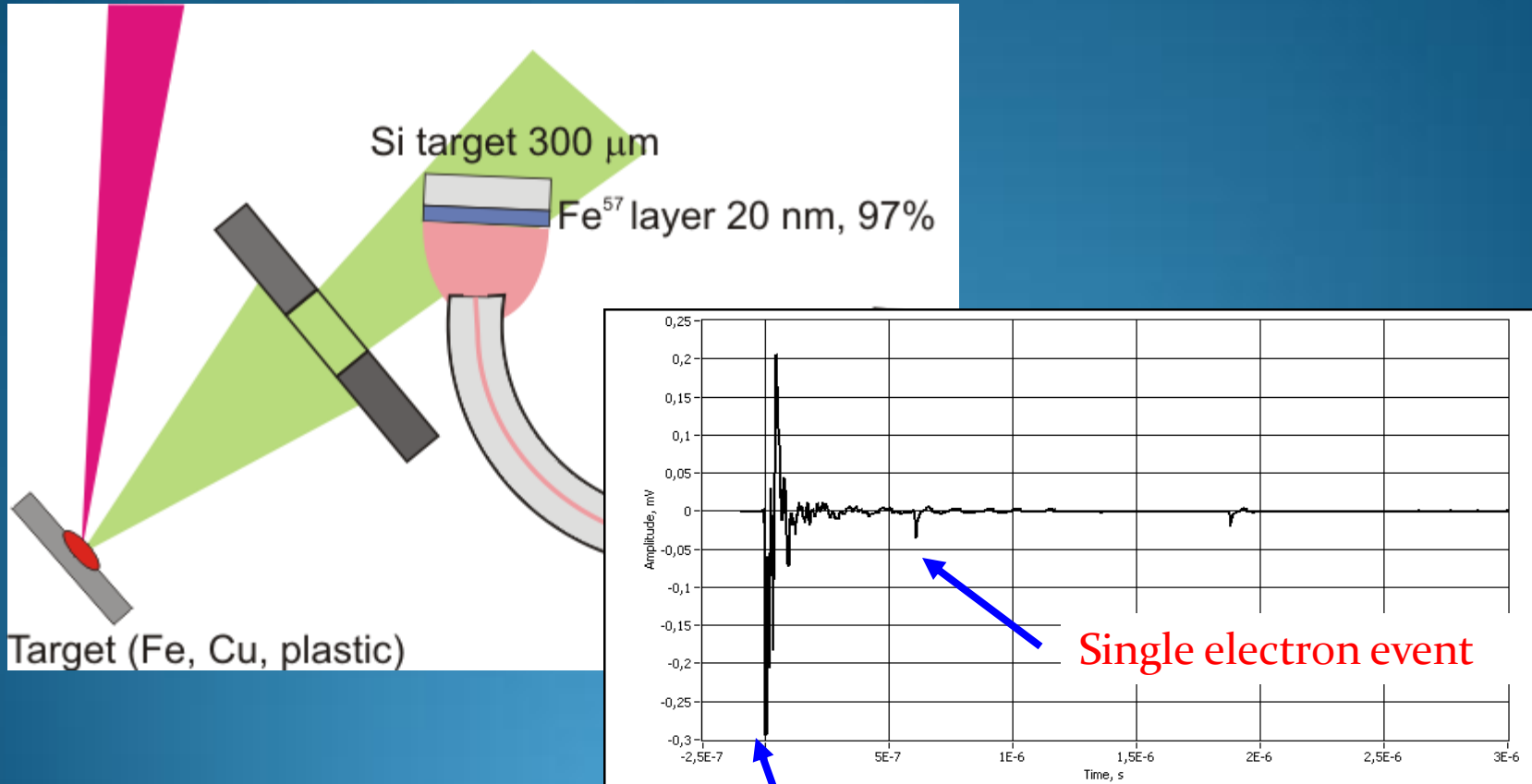


Ti:Sapphire Laser

МЛЦ МГУ

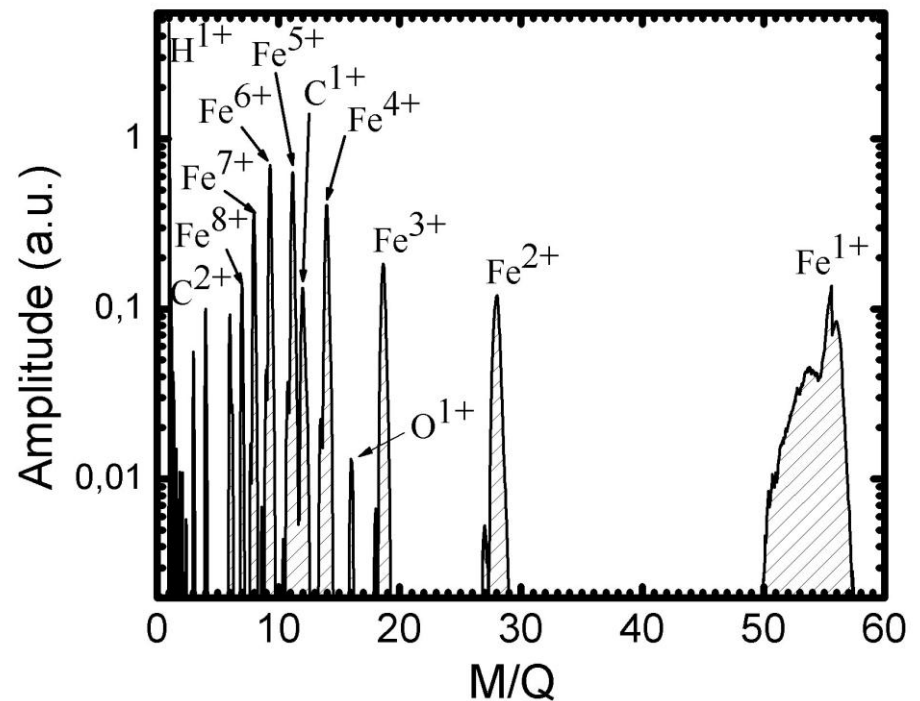
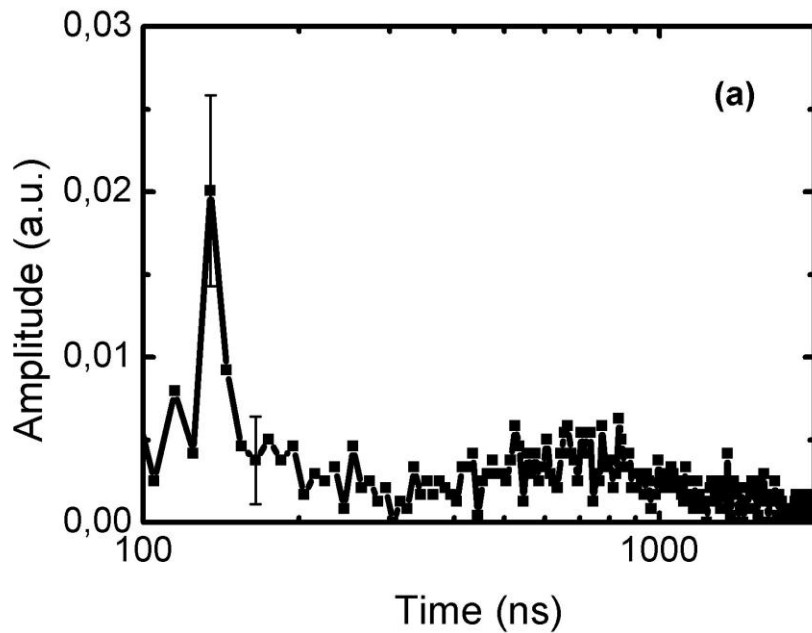
- Energy per pulse **1-25 mJ**
- Energy stability **3%** rms within 1 hour
- Pulse duration **50 fs**
- Central wavelength **805 nm**
- Spectral bandwidth **23 nm**
- Repetition rate **10 Hz**
- $M^2 = 1.7$
- Nanosecond contrast **4×10^6**
- Picosecond contrast better than **10^5**

IEC detection



Signal from scattered electrons

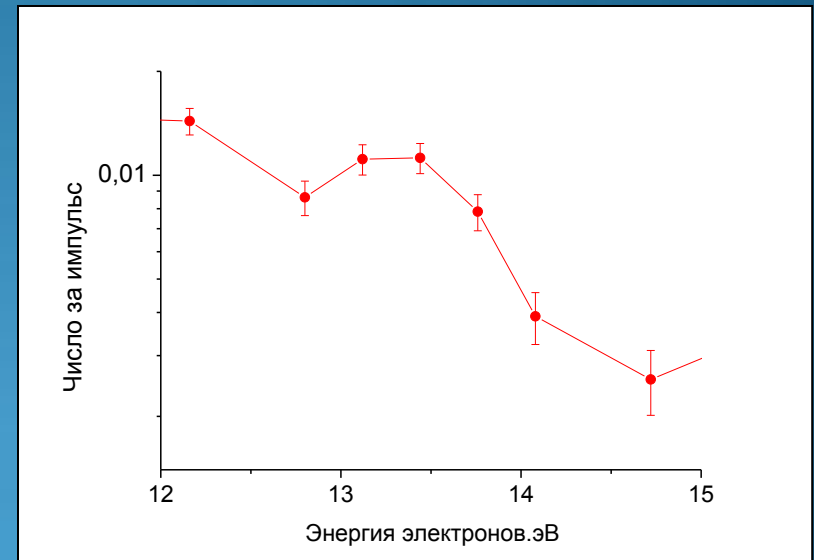
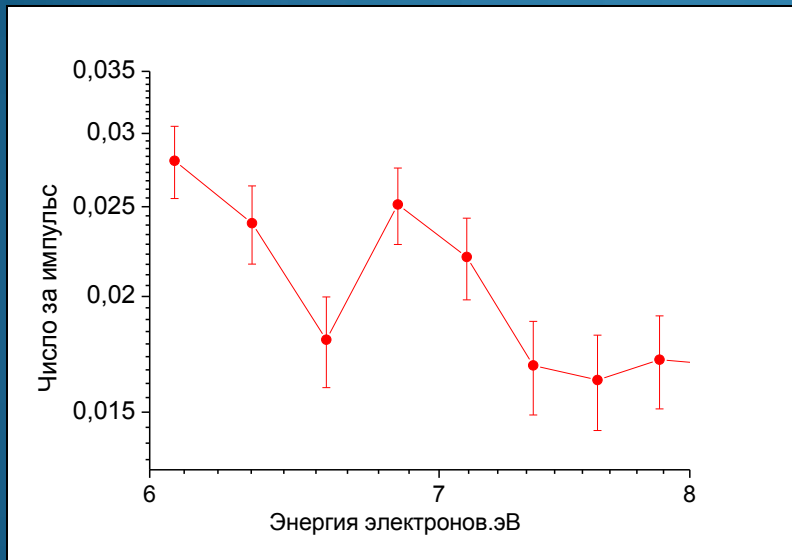
Средний ток вторичных электронов



Наблюдение ВЭК

ВЭК ^{57}Fe

$I \sim 10^{17} \text{ Вт/см}^2$



К проблеме гамма-лазера

Источник E-Light


- Длина волны - $1 \mu m$
- Энергия в импульсе - $3 \cdot 10^3 J$
- Мощность - $200 PW$
- **Рентгеновское излучение плазмы**
 - Диапазон: $1 keV - 3 MeV$
 - Длительность импульса: $100 fs$
 - Энергия в импульсе: $100 J$

Основные трудности мессбауэровских схем


- Время жизни: $\geq 1 \text{ ns}$
- Энергия перехода: $\leq 10 \text{ keV}$
- Коэффициент внутренней конверсии: 100
- Используется первый возбужденный уровень изотопа, что требует для получения инверсии возбуждения больше половины ядер.

ДИЛЕММА ГАММА ЛАЗЕРА

Противоречие между интенсивной накачкой, разрушающей или нагревающей активную среду и необходимостью поддержания температуры среды не выше комнатной для повышения вероятности эффекта Мессбауэра.



Современные фемтосекундные лазерные системы, генерирующие поля экстремальной интенсивности, становятся новым мощным физическим инструментом в самых различных областях экспериментальной ядерной физики, физики частиц, астрофизики и др.



В частности существенный интерес представляют такие области, как спектроскопия низколежащих ядерных состояний и генерация когерентного гамма-излучения