

Лазерно – индуцированные
ядерные процессы в поле
сверхмощных
фемтосекундных лазерных
импульсов

Савельев А.Б.

План доклада

- *Шкала интенсивностей светового поля: от атомного до экстремального*
- *Генерация сверхинтенсивных световых полей*
- *Ядерная физика с использованием лазера*
- *Достижения и планы*

*Сверхинтенсивные световые поля:
шкала интенсивностей*

Ultraintense laser fields

Field ionization (multiphoton, tunnel, etc.):

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

$\gamma \gg 1$ 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”

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

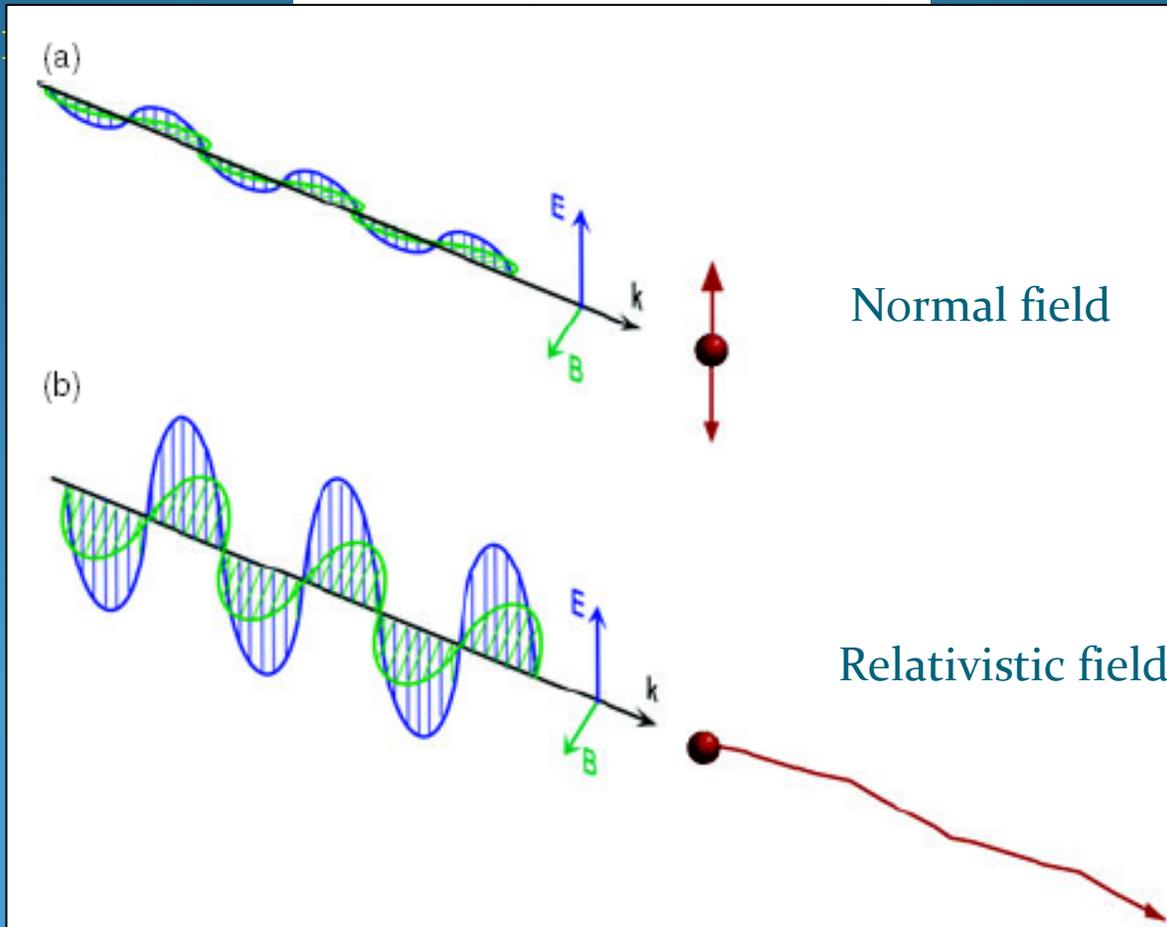
$$\mathcal{E}_{osc} = \frac{q^2 E^2}{2 m_e \omega^2} = \frac{q^2 I \lambda^2}{\pi m_e c^3}$$

$$Q = I \lambda^2$$

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

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):

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

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

SLAC – нелинейное комптоновское рассеяние электронов с энергией 46.6 ГэВ на лазерном импульсе при интенсивности 10^{18} Вт/см² (в СО электрона – 10^{28} Вт/см²) и рождению пар фотонами с энергией 29.2 ГэВ, сталкивающимися с лазерным импульсом

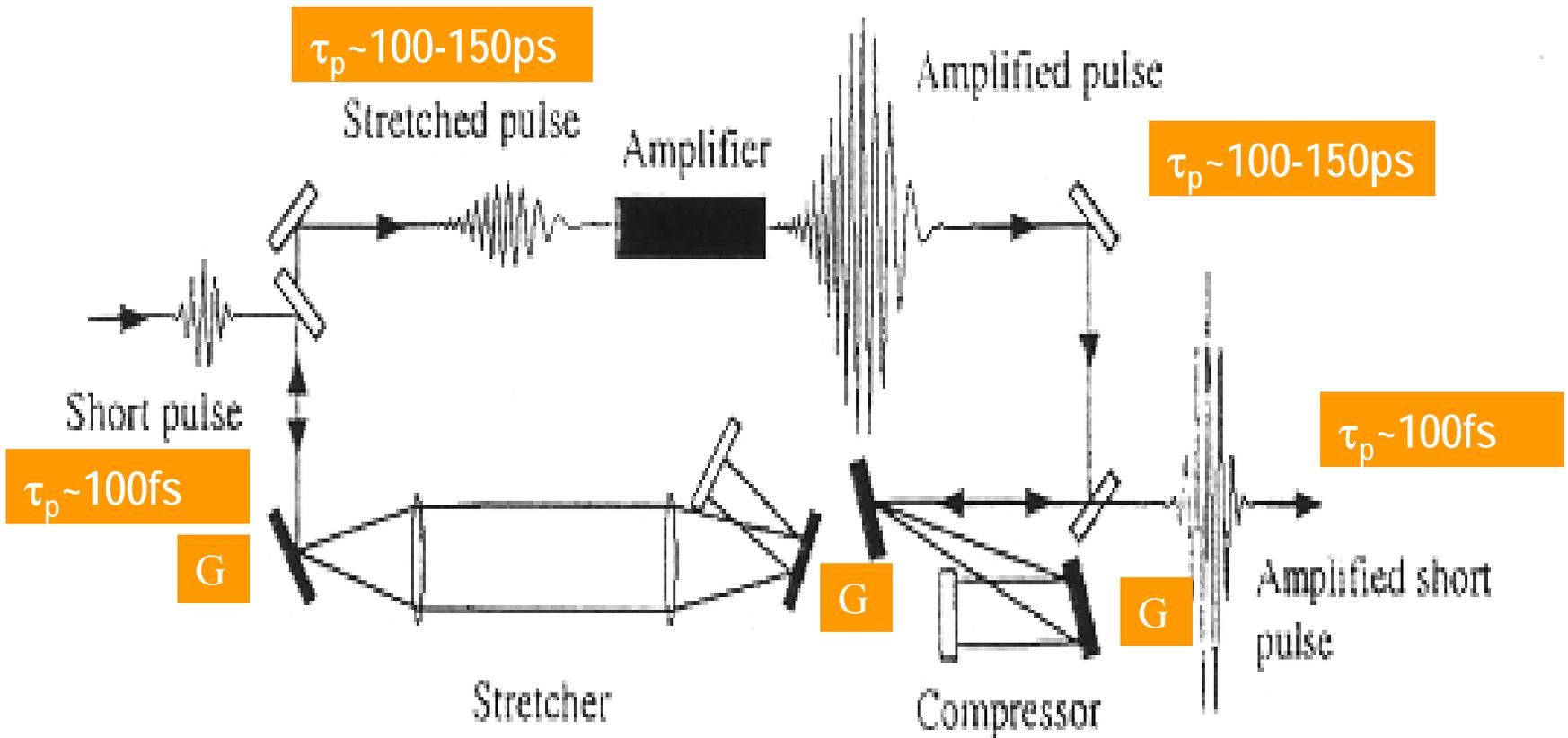
Генерация сверхинтенсивных световых полей

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

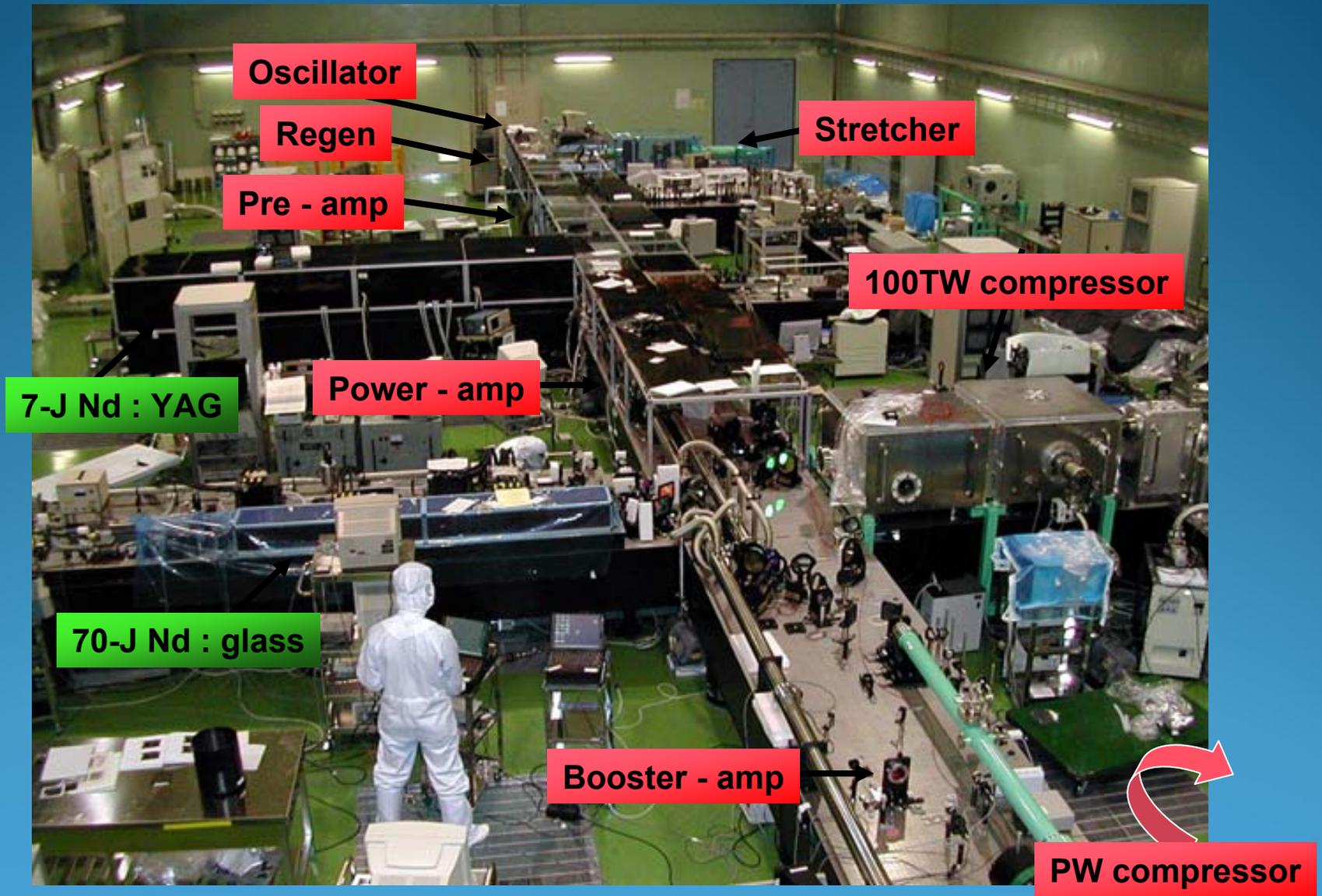
$$\tau \sim 10 \text{ фс} \quad S \approx 1 \text{ мкм}^2 \quad W \approx 1 \text{ Дж}$$

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

CPA concept



Petawatt Ti:Sa (JAERI-APRC)



Максимальная интенсивность

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

Novel approaches

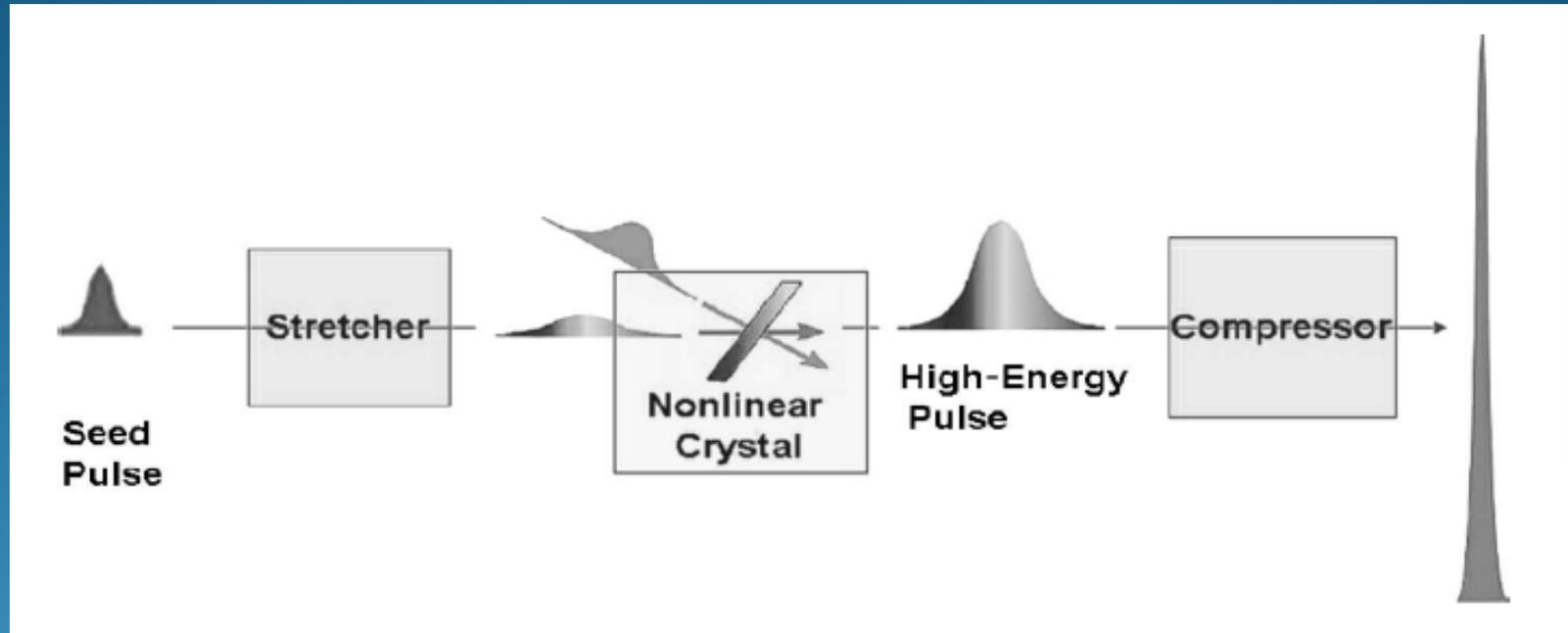
Elements damaging prevents further amplification

- 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



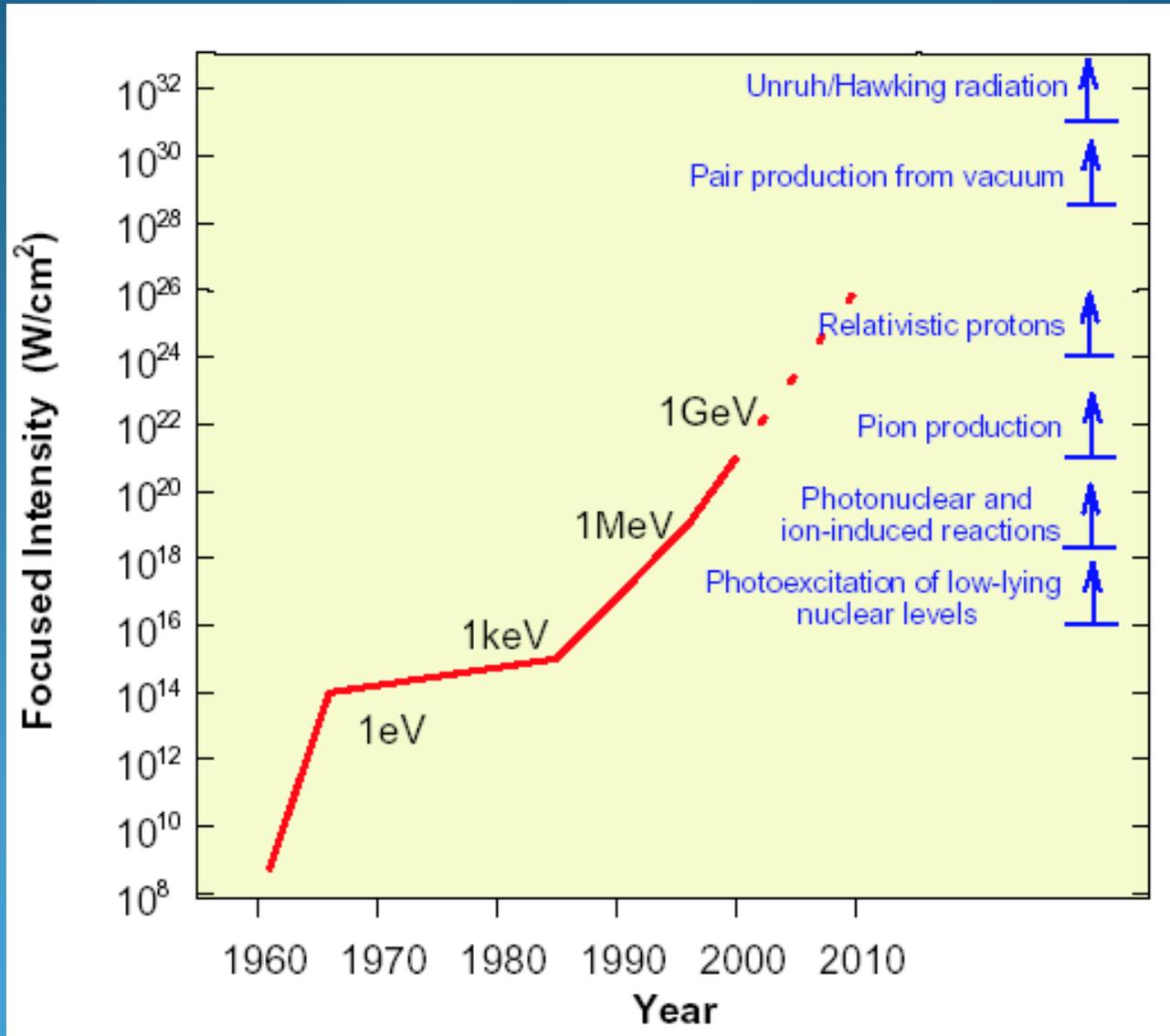
Разрабатываемые лазеры

- 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) $4 \times 10 \text{ kJ}$, 10 ps
 - РФЯЦ – ВНИИЭФ «ISKRA-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.

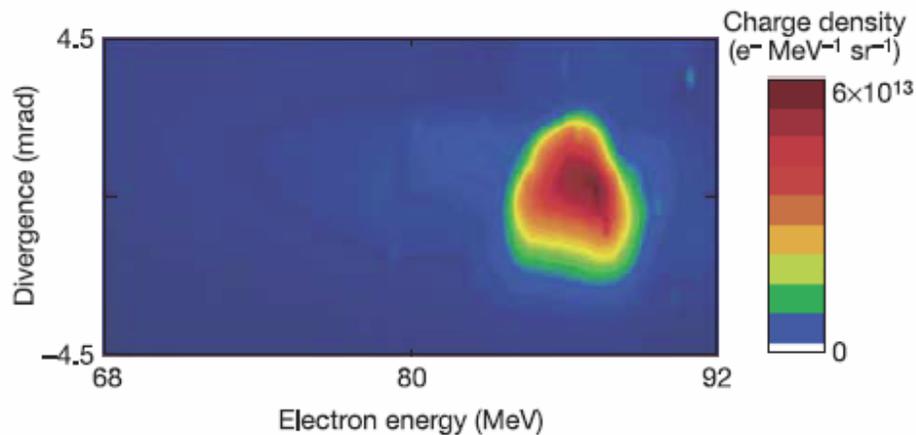
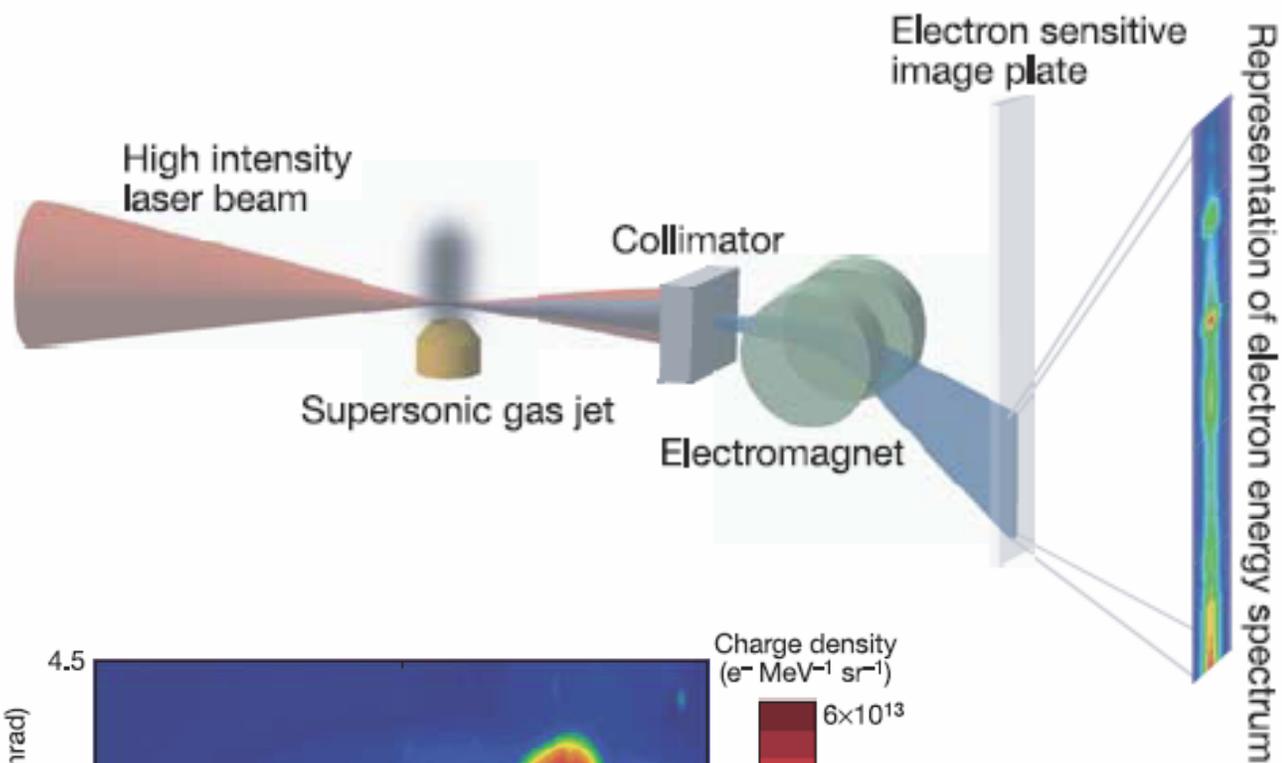
Лазерно-индуцированные ядерные процессы

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

Electron quiver energy

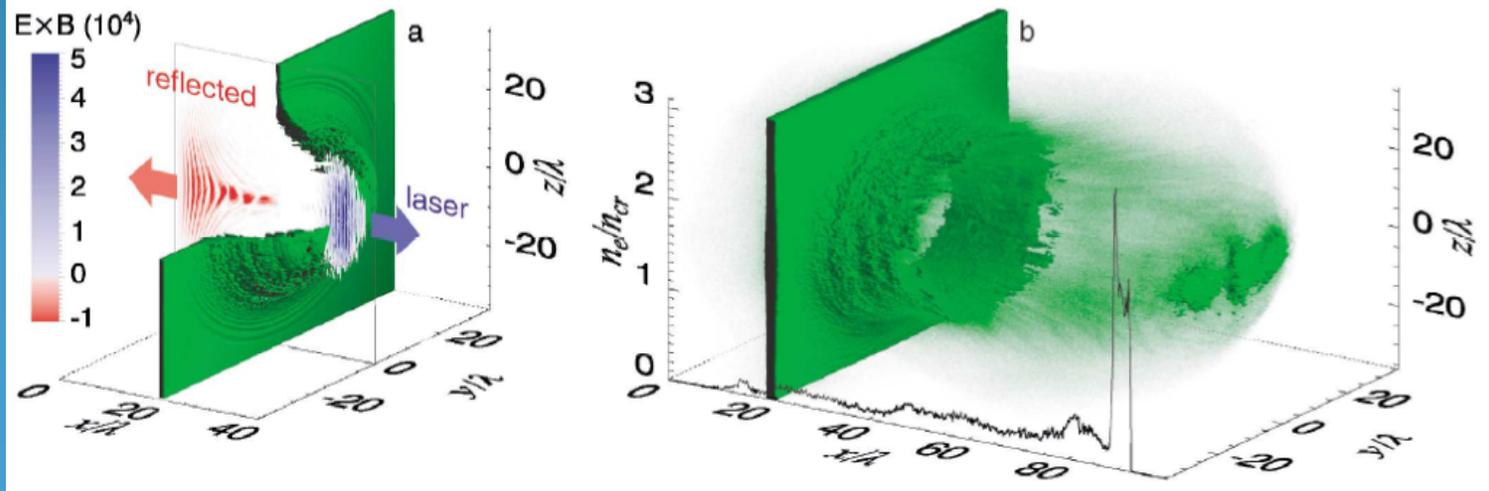
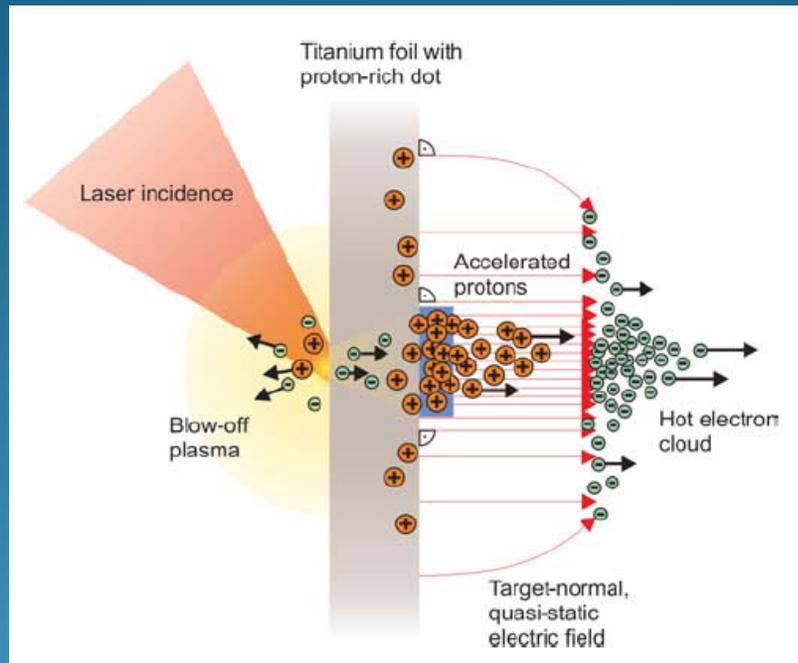


Лазерно-плазменные ускорители электронов и ионов



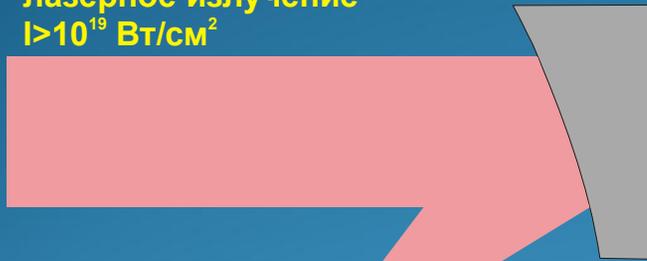
Энергия: 1-5 ГэВ
Заряд: ~ 1 нК

Ускорение ионов



General scheme for plasma induced nuclear reactions

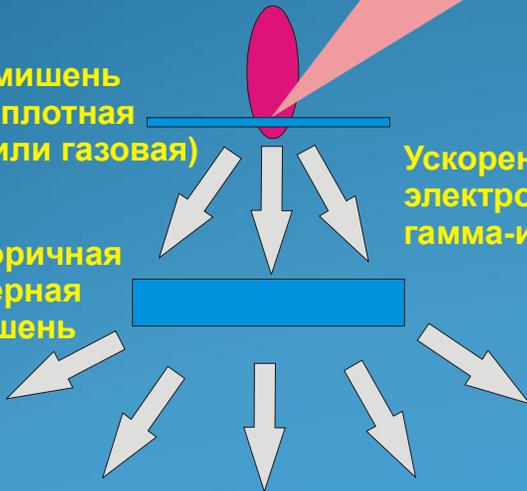
Фемтосекундное лазерное излучение
 $I > 10^{19}$ Вт/см²



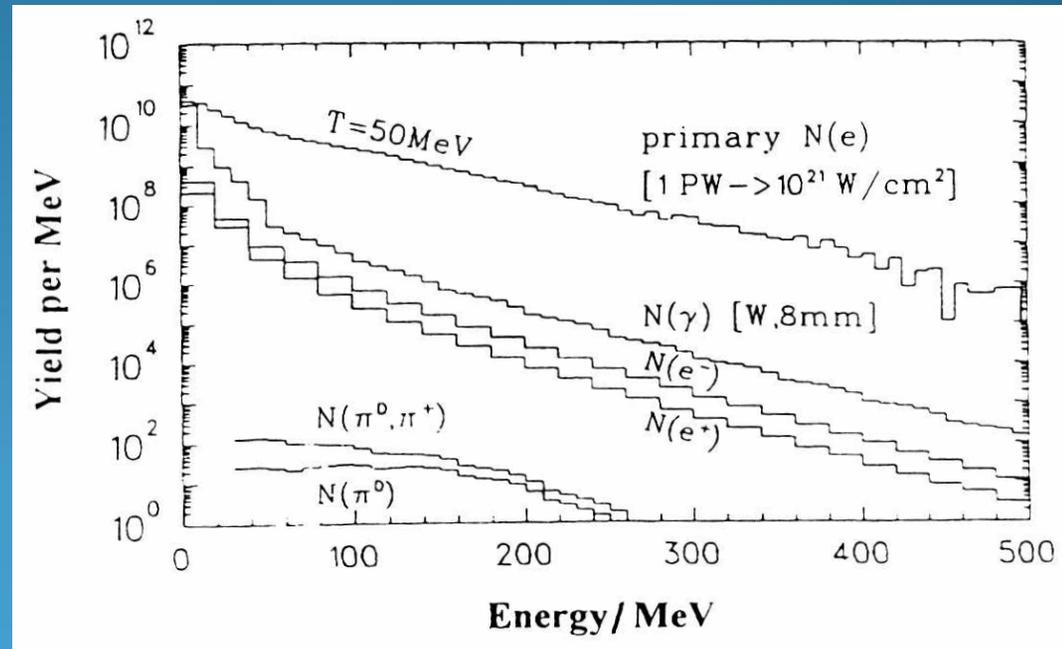
мишень
(плотная
или газовая)

Ускоренные
электроны, ионы,
гамма-излучение

Вторичная
ядерная
мишень



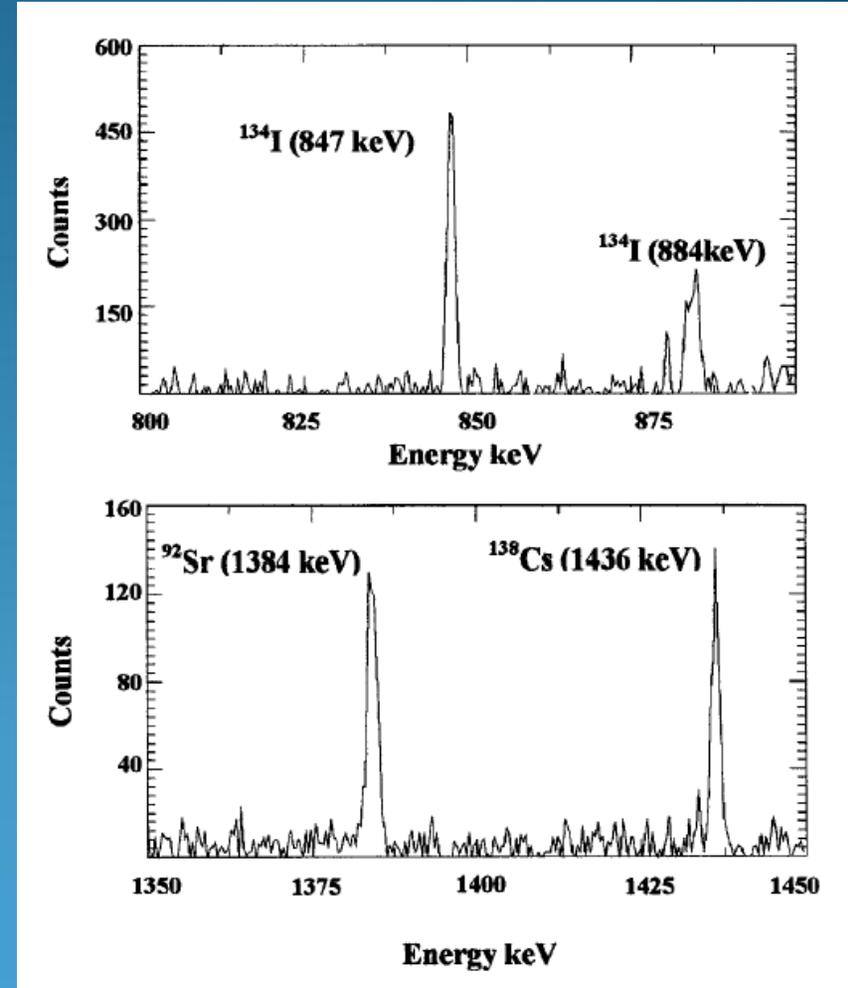
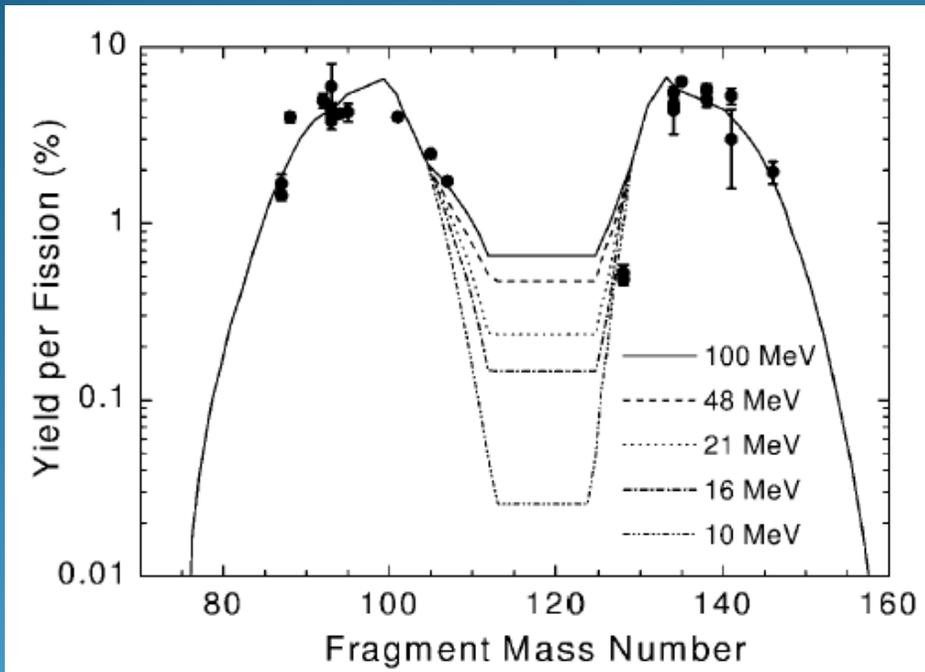
Продукты ядерных реакций
(изотопы, изомеры, нейтроны
протоны, альфа и бета частицы и пр.)



Photoinduced nuclear reactions:



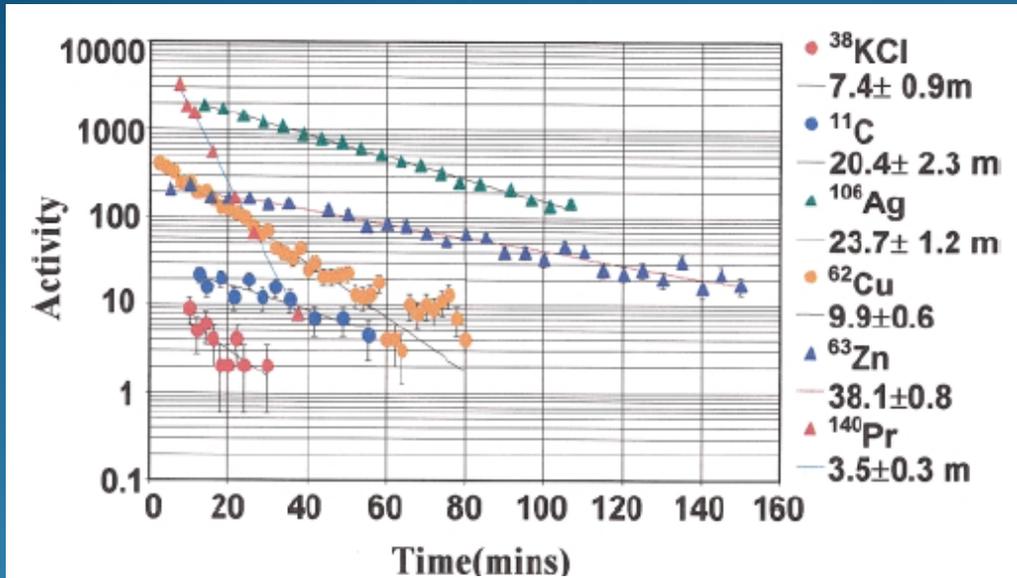
$I \sim 5 \times 10^{19} \text{ W T/cm}^2$, $\tau \sim 1 \text{ ps}$



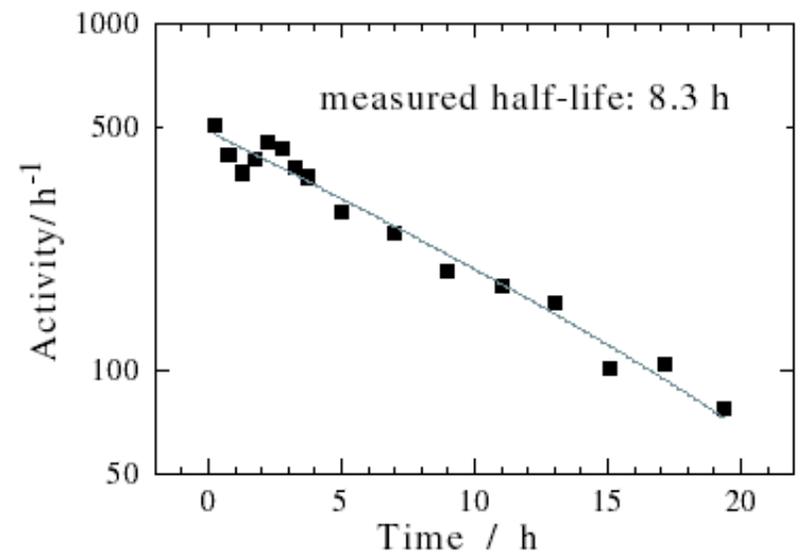
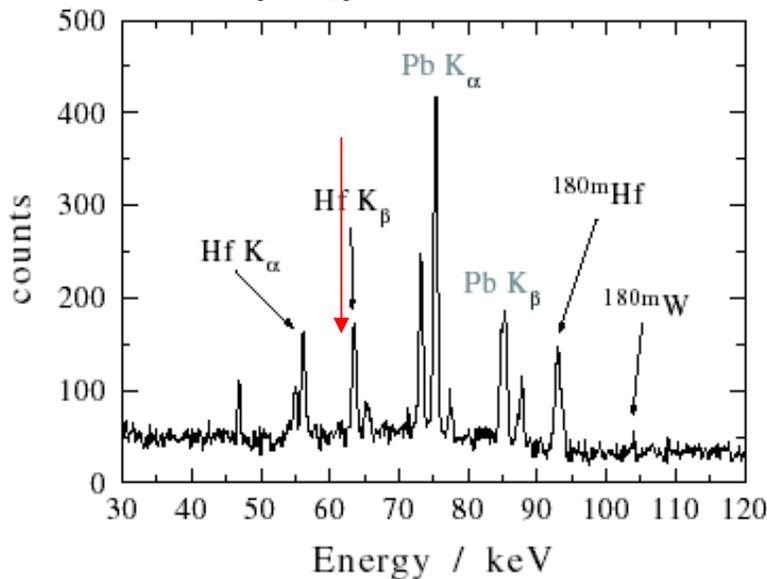
Rutherford: K.W. D. Ledingham, I. Spencer, T. McCanny, et al PR1 84 899 (2000)

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

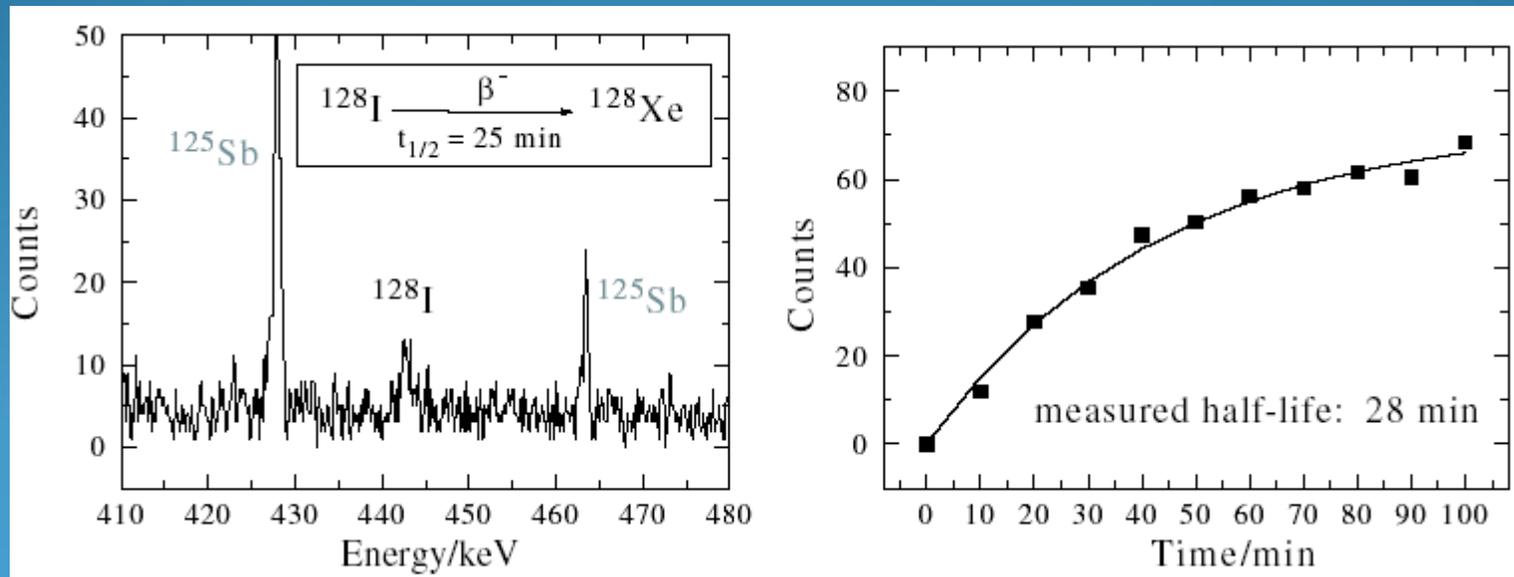
Photoinduced reactions (γ, n) : isotope production



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



Isotope transmutation



Positrons

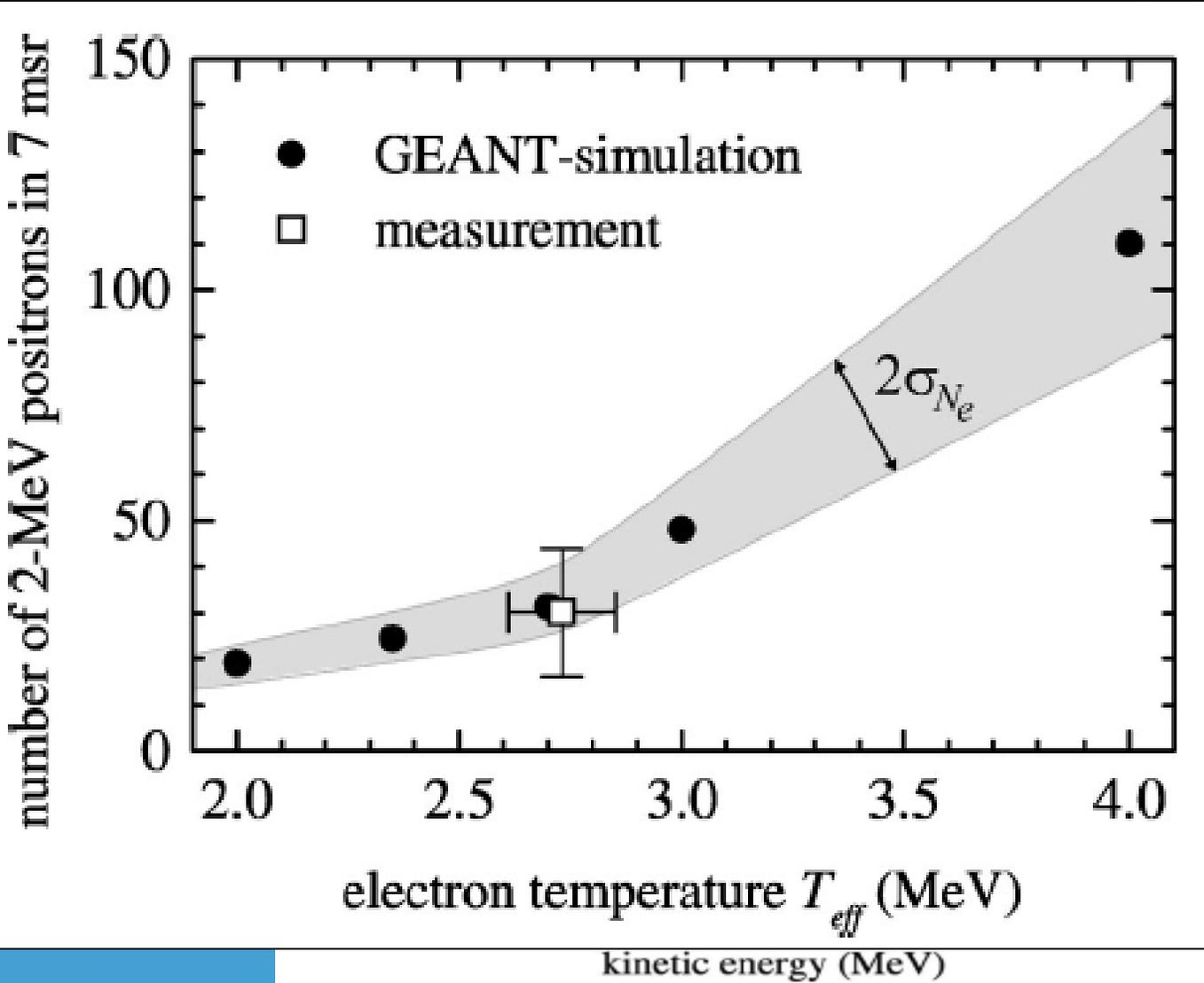
Reaction
For 5 MeV

$$\dot{n}_{ei} : \dot{n}_{ee} : \dot{n}_{\beta}$$

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

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

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

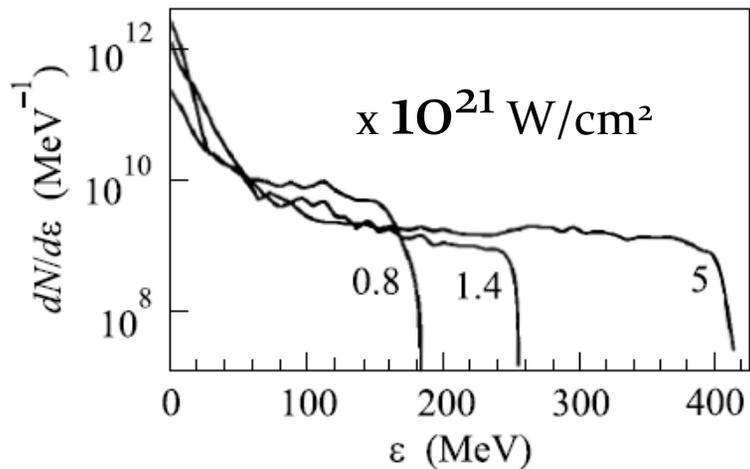


31

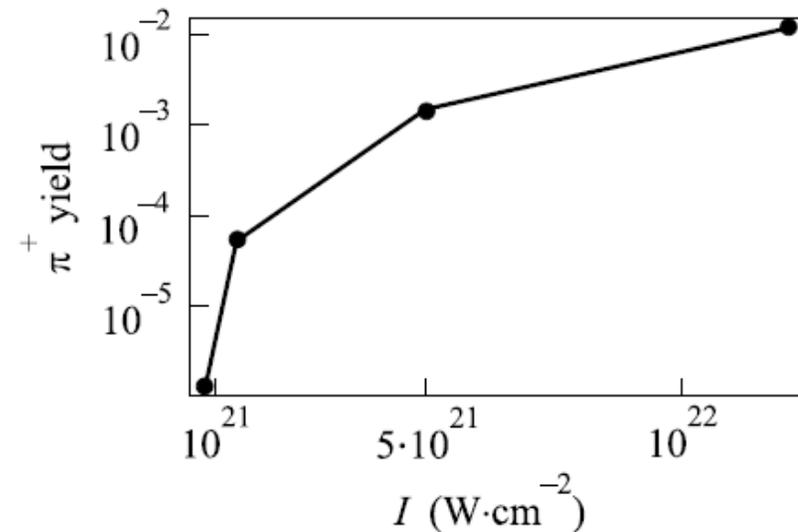
Pions

$p \rightarrow C \rightarrow \pi^+$ (threshold - 140 MeV)

Proton spectra

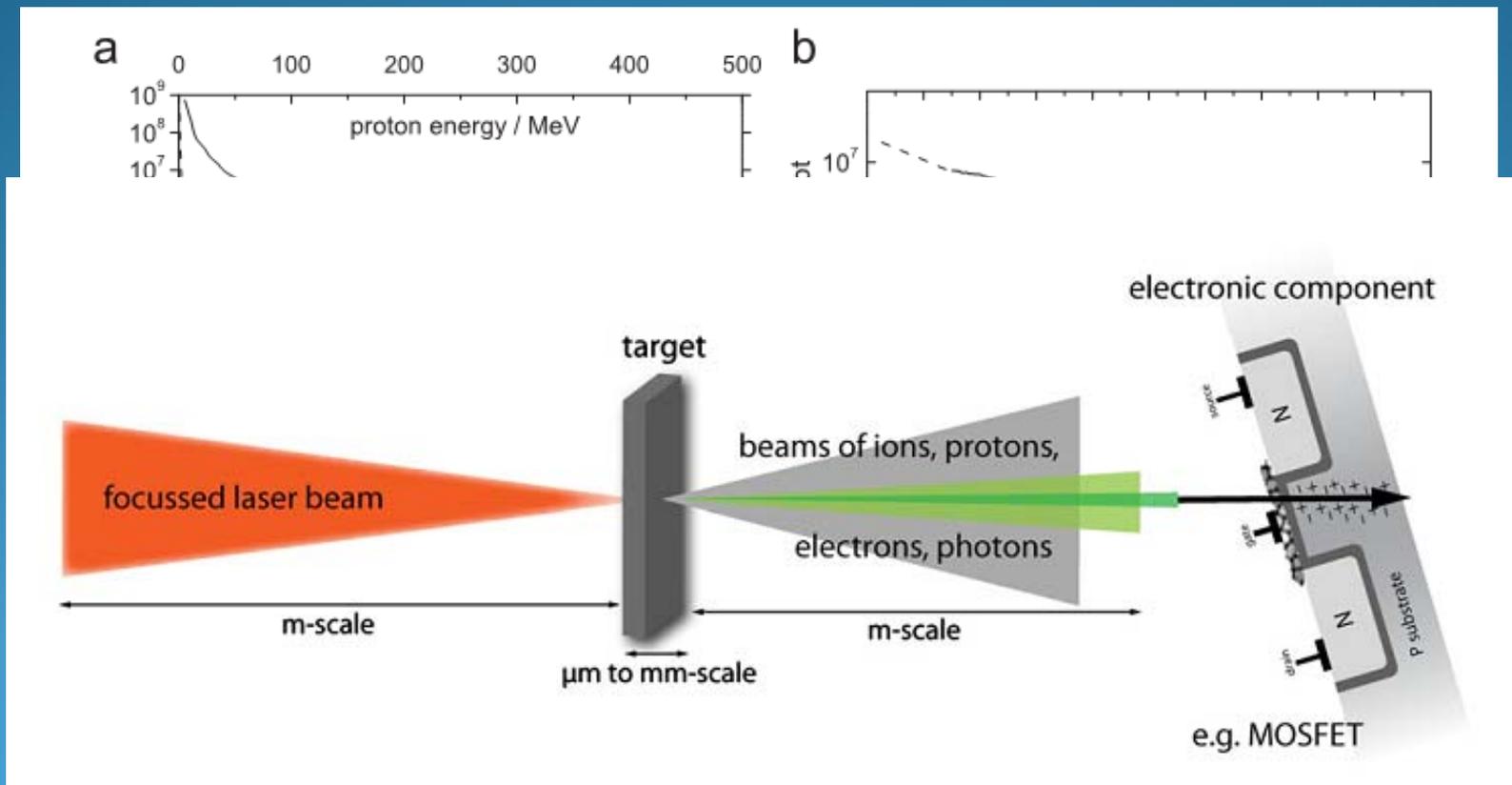


π^+ yield



Влияние потоков космических частиц на работоспособность бортовой электроники в режиме «одного события»

Сравнение спектров частиц в области радиационных поясов ван_Аллена и при лазерном воздействии на мишень



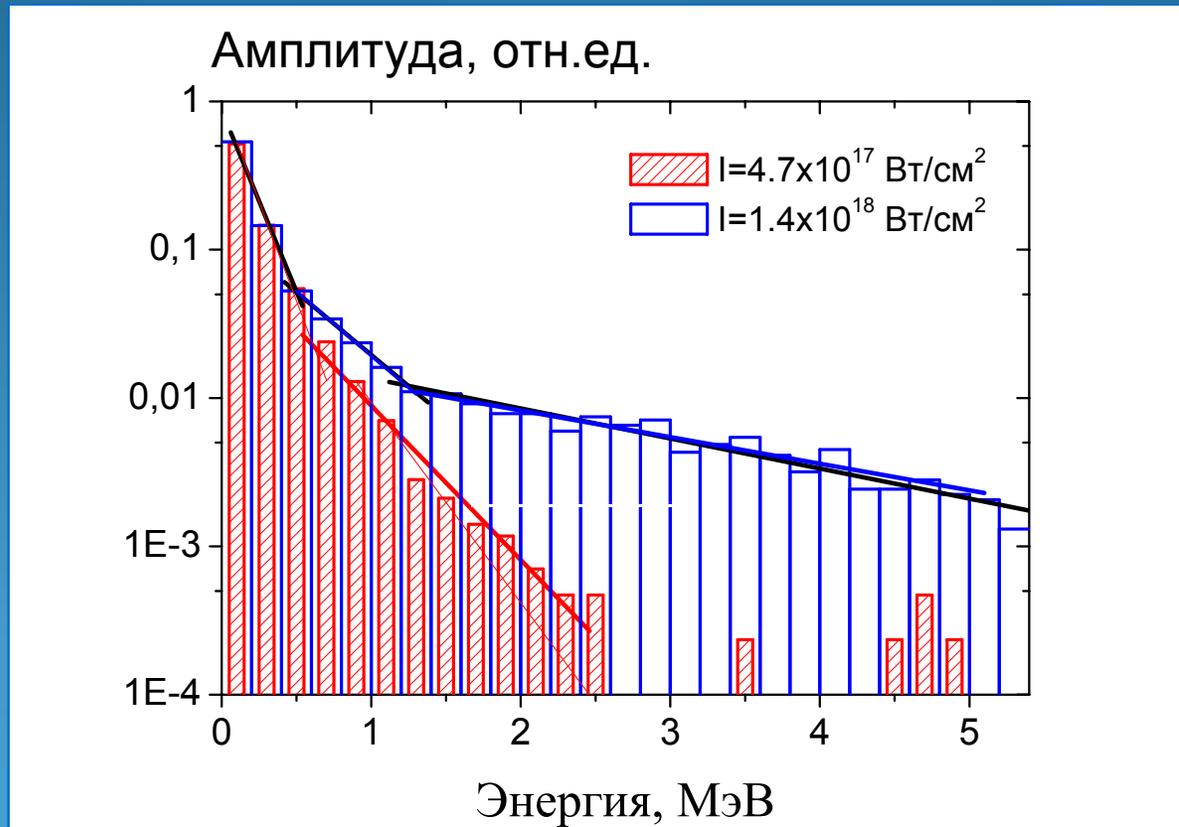


Ti:Sapphire Laser

МЛЦ МГУ

- Energy per pulse **1-50 mJ**
- Energy stability **3%** rms within 1 hour
- Pulse duration **50 fs**
- Intensity up to **10^{19} W/cm²**
- 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**

Генерация релятивистских электронов и гамма-квантов в плазме



Наши ближайшие планы (интенсивность до 10^{19} Вт/см²)

- Изучение процессов под действием пучков быстрых заряженных частиц и энергетичных фотонов, формируемых при воздействии излучения релятивистской интенсивности на плотные мишени: исследование индуцированных ядерных реакций и процессов, остаточной радиоактивности материалов, разработка новых методик активационной диагностики корпускулярных и фотонных пучков с большой энергией частиц, применимых, в том числе, при регистрации ультррелятивистских частиц.
- Исследование релаксации возбужденных ядер по каналам внутренней электронной конверсии и гамма-распада при их возбуждении электронами и фотонами плазмы. Исследование будет проводиться как при возбуждении из стабильного основного состояния изотопов, так и для случая возбуждения из метастабильного состояния, также создаваемого излучением плазмы.

Перспектива развития (интенсивность 10^{21} Вт/см² и выше)

- Короткоживущие изотопы легких элементов для позитронной эмиссионной томографии (реакции типа ${}^A_Z\text{V} (p,n) {}^A_{Z+1}\text{C}$).
- Трансмутация гамма-излучением метастабильных долгоживущих изотопов (${}^{99}\text{Tc}$ и ${}^{129}\text{I}$), характерных для ядерных отходов атомной промышленности.
- Источник позитронов для позитронной спектроскопии и позитронной физики.
- Создание сильновозбужденных ядер в реакциях столкновения двух тяжелых ионов.
- Фотовозбуждение ядер, создания метастабильных состояний, исследования возбуждения из таких состояний.
- Рассеяние релятивистских ионов и исследование многофотонных обменов и нелинейных эффектов, которые проявляются в сильных электромагнитных полях.
- Измерение неизвестных сечений ядерных реакций ((γ,n) и (γ,p)) для одного и того же изотопа, например, ${}^{25}\text{Mg}$, ${}^{48,49}\text{Ti}$, ${}^{68}\text{Zn}$ и др.



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.



Достижение поставленных целей возможно лишь при объединении усилий лазерных физиков, ядерщиков, специалистов по физике плазмы и другим направлениям из институтов РАН, МГУ и других учреждений.



Необходимо создание **Лазерного центра физики высоких энергий** с лазерной установкой пиковой мощностью не менее 200 ТВт как ядра для такого объединения.