

# Ядерная фотоника

А. Б. Савельев

## Ядерная фотоника

Ядерная фотоника – уникальные перспективы и новые методы для ядерной физики и физики частиц с использованием экстремальных световых полей

В.Недорезов, С.Рыкованов, А.Савельев УФН 191(12) 1281–1306 (2021)

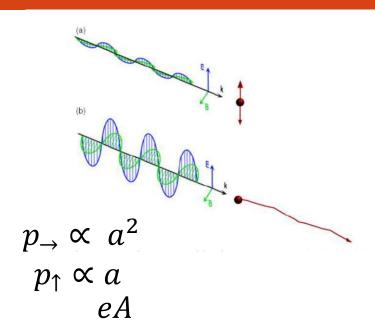
#### Что нового могут дать сверхмощные лазеры?

В рамках традиционных подходов:
🗖 Лазерное ускорение электронов, позитронов, протонов и адронов
Генерация тормозного гамма излучения в мишени конверторе
□ Комптоновское рассеяние лазерного излучения на пучке электронов из линейного или лазерного ускорителя
Формирование нейтронных импульсов
Новые подходы и методы:
Формирование сверхинтенсивных потоков гамма-излучения при «пробое вакуума»
Встречное ускорение пучков адронов
□ Прямое воздействие лазерного излучения на ядро (возбуждение ядер, ускорение распада?)
□ ????

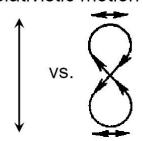
### План доклада

- ✓ Экстремальные электромагнитные поля
- ✓ Лазерно-плазменные ускорители заряженных частиц
- ✓ Источники рентгеновского и гамма излучений с использованием лазеров
- ✓ Особенности и преимущества лазерных ускорителей и источников для ядерно-физического эксперимента
- ✓ Новые задачи на стыке лазерной физики, физики ядра и физики частиц
- ✓ Лазерно-плазменный ускоритель электронов МГУ

## Экстремальные электромагнитные поля

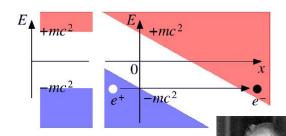


Plasma electron nonlinear relativistic motion



Laser wakefield

**Vacuum** nonlinearity



Schwinger field for vacuum breakdown



Nonlinear QED fields General relativistic effects Vacuum probe (s.a. Dark energy)

 $e|E|\Lambda_{\rho} \approx 2mc^2$ 

Critical power for self-focusing in matter /plasma / vacuum: χ<sub>3</sub> nonlinearity

$$P_{cr} = \lambda^2 / (2\pi n_0 n_2) \sim \text{GW}$$

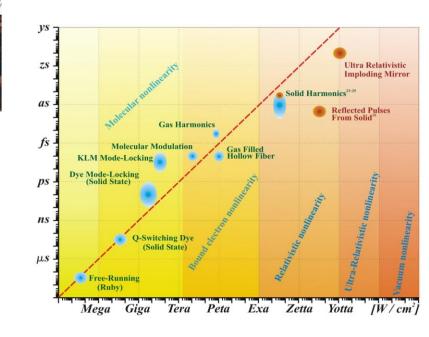
relativistic plasma nonlinearity

$$P_{cr} = mc^{5}/e^{2}(\omega/\omega_{p})^{2} \sim 17 (\omega/\omega_{p})^{2} \text{ GW}$$

vacuum nonlinearity

$$P_{cr} = (90/28) c E_S^2 \lambda^2 / \alpha \sim 10^{15} (\lambda / \lambda_{1u})^2 \text{ GW}$$

e.g. X-ray of 10keV, 
$$P_{cr} \sim 10$$
PW



 $m\dot{v} = eE \rightarrow |\dot{v}| = \frac{e|E|}{} \approx c$ 

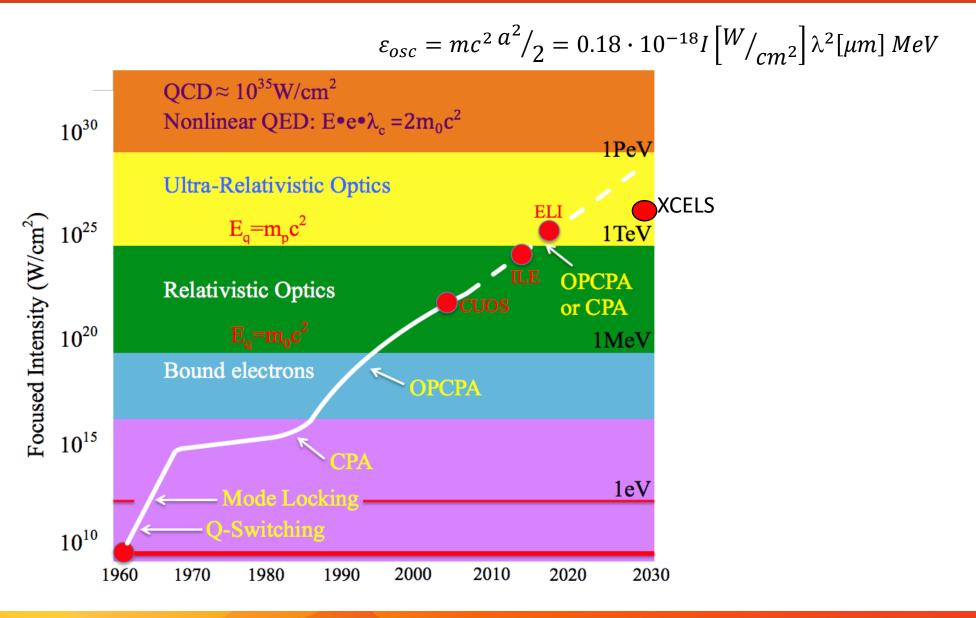
 $a = 0.85 \cdot 10^{-9} I \left[ \frac{W}{cm^2} \right] \lambda [\mu m] \approx 1$ 

Compact high energy colliders

Compact accelerator applications

PeV acceleration for quantum gravity →

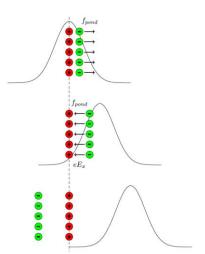
## Экстремальные электромагнитные поля

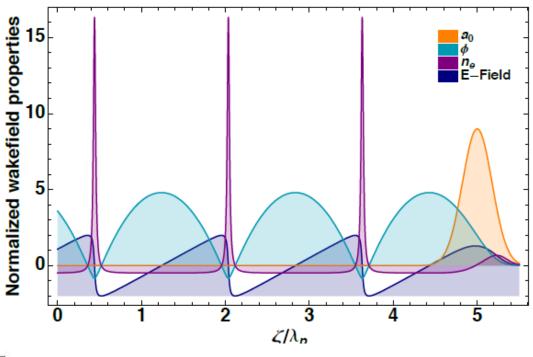


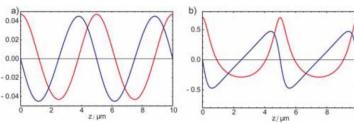
## Лазерно-плазменные ускорители электронов



$$E_0 = (en_0/\epsilon_0 k_p) = mc\omega_p/e \approx 0.96\sqrt{n_e \,[\text{cm}^{-3}]} \,\text{Vcm}^{-1}$$







$$E_{\text{max}}/E_0 \sim a_0^2/\left(1+a_0^2\right)^{1/2}$$



$$E_{\rm wb} = \sqrt{2(\gamma_{\rm p} - 1)}E_{\rm p}$$

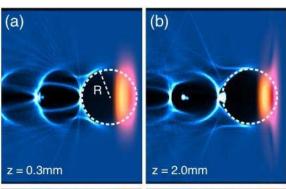


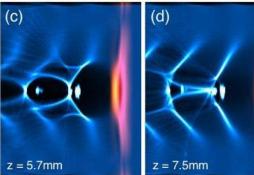
## Режим плазменного пузыря

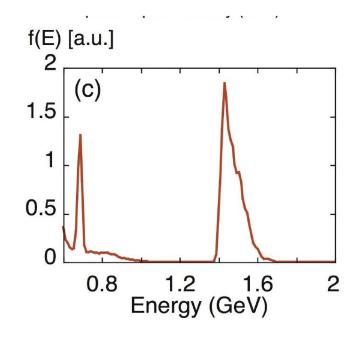
$$k_p R \simeq k_p w_0 = 2\sqrt{a_0}.$$

$$c\tau_{\text{FWHM}} > 2R/3$$
.

$$L_d \simeq \frac{c}{c - v_{\phi}} R \simeq \frac{2}{3} \frac{\omega_0^2}{\omega_p^2} R.$$



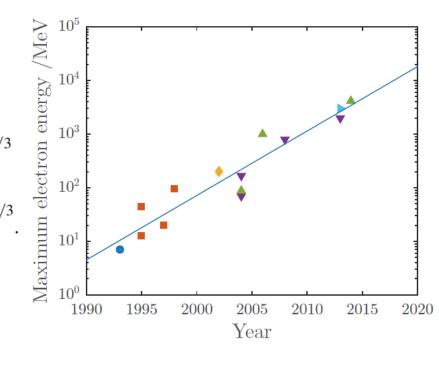




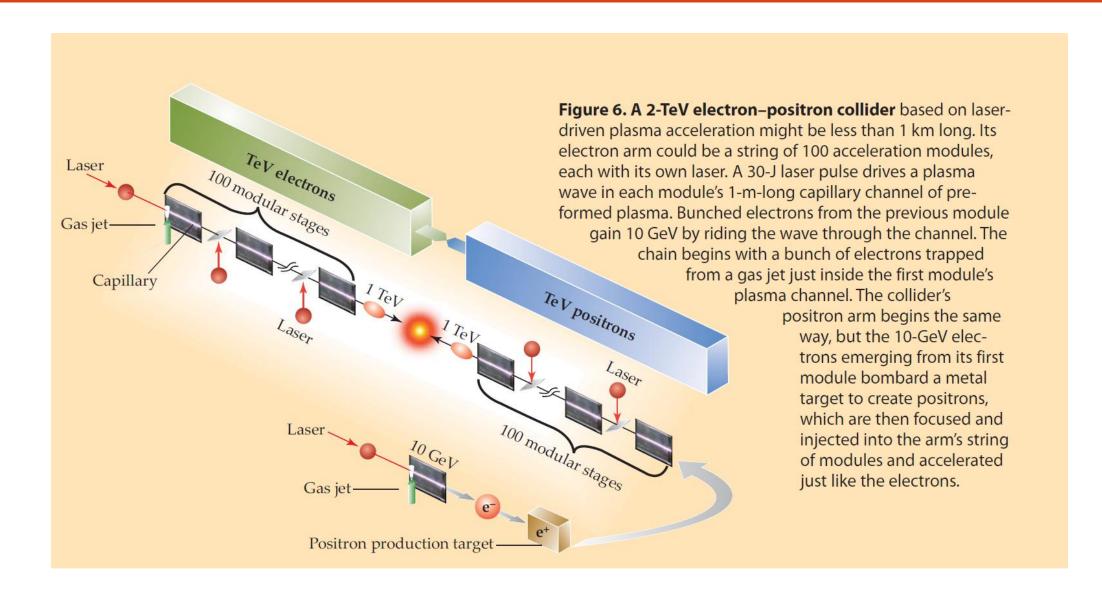
$$\Delta E \simeq \frac{2}{3} mc^2 \left(\frac{\omega_0}{\omega_p}\right)^2 a_0 \simeq mc^2 \left(\frac{P}{m^2 c^5 / e^2}\right)^{1/3} \left(\frac{n_c}{n_p}\right)^{2/3}$$
 
$$\Delta E [\text{GeV}] \simeq 1.7 \left(\frac{P[\text{TW}]}{100}\right)^{1/3} \left(\frac{10^{18}}{n_p [\text{cm}^{-3}]}\right)^{2/3} \left(\frac{0.8}{\lambda_0 [\mu\text{m}]}\right)^{4/3}.$$

$$\Delta E[\text{GeV}] \simeq 3.8 \left(\frac{P}{P_c}\right)^{-2/3} \frac{P[\text{TW}]}{100}.$$

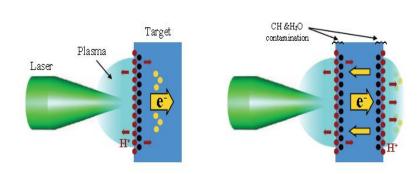
35 fs, 31 J, 850 TW,  $a_0$ =2.2 20 cm acceleration length in capillary

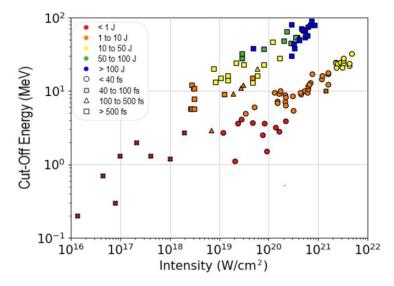


## Электрон-позитронный коллайдер



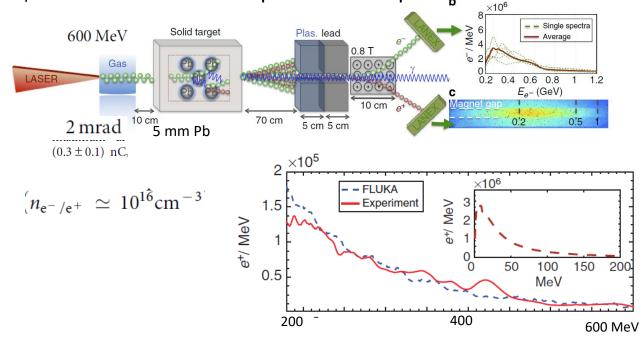
## Лазерно-плазменное ускорение ионов и вторичные пучки



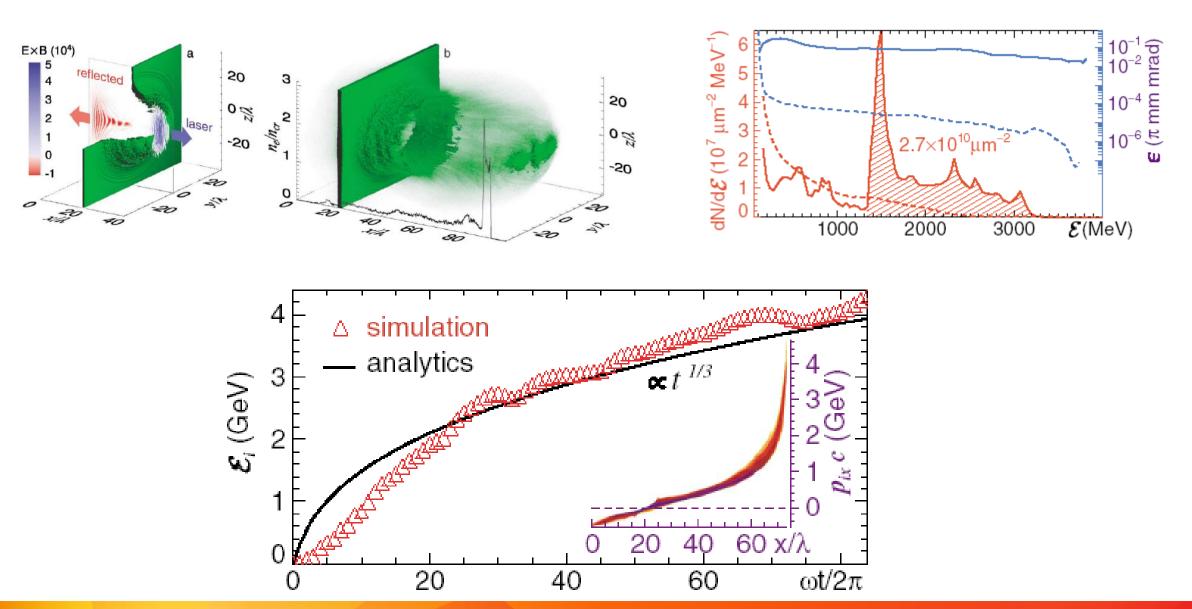


- ✓ Позитроны
- ✓ Нейтроны  $(\gamma,n)$ , d(d,n), p(Z,n)
- **√** ..

- □ Ядерная астрофизика
  - ✓ Литиевая проблема
  - ✓ s и r-процессы (потоки нейтронов 10<sup>22</sup>-10<sup>24</sup> n c<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>)
- □ Ядерная медицина
  - ✓ Наработка изотопов для SPECT, PET
  - ✓ FLASH технологии
  - ✓ IBT
- Трансмутация тяжелых изотопов
- □ Радиационная стойкость материалов и микросхем

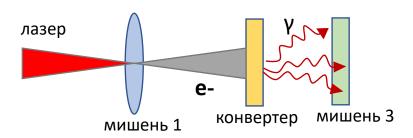


## Релятивистские ионные пучки



## Источники гамма излученния

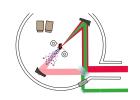
#### - тормозное излучение



- + большой заряд пучка электронов
- + широкий спектр вплоть до десятков МэВ
- 🕇 простота реализации
- **+** мишень рядом с гамма-источником
- сложно выделить узкую полосу
- большая расходимость
- существенный радиационный фон

Повышение интенсивности и (или) энергии лазерного импульса — увеличение потока гамма-квантов и их энергии

- комптоновское рассеяние
- С использованием лазерного ускорения электронов
   DLA, LWFA, новые схемы

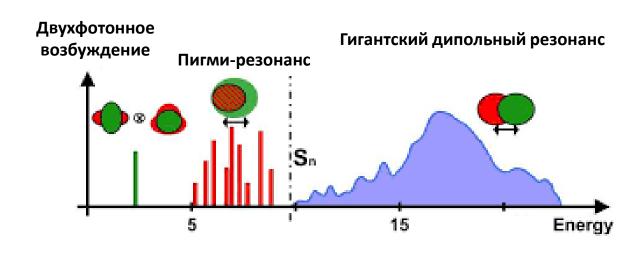


- С использованием линейного ускорителя
  - ✓ Томсоновский генератор на линейном ускорителе 50 МэВ **(НЦФМ)** до 50 кэВ, отработка методик по фотокатоду и точке взаимодействия (НИИЯФ, физфак, ВНИИЭФ, ИЯИ) + 20 ТВт или 400 Дж (нс)
  - ✓ В сочетании с ускорителем с-тау фабрики (НЦФМ)
     до 100 МэВ
  - 🕂 узкий спектр
  - + перестройка по энергии квантов ( $\Theta$ - $\lambda$ )
  - 🕇 малая расходимость
  - + угловой момент фотонов
  - малый заряд
  - для перехода в область 10 МэВ и выше нужны электроны с энергией 0.5 ГэВ и более
  - мишень вдали от источника

Повышение интенсивности и (или) энергии лазерного импульса — нелинейное рассеяние или увеличение сечения пучка — ухудшение монохроматичности и другие проблемы

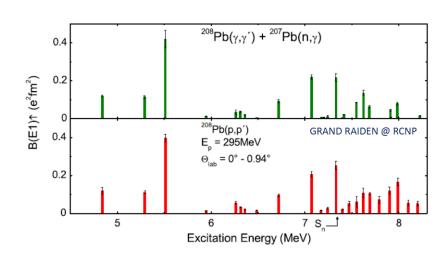
### Исследование сечений фотопоглощения

$E_{\gamma}$ , МэВ	Направление исследований
До 5	Астрофизика
5-10	Коллективные возбуждения ядер Гигантские резонансы. Пигми-резонансы
30-150	Кластерные состояния. Квазидейтроны
150-2000	Нуклонные резонансы. Фоторождение мезонов. Статическая, динамическая, спиновая структура нуклонов
До 10 <sup>6</sup>	Векторная доминантность, адронизация фотонов

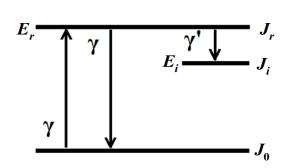


#### Преимущества методов ядерной фотоники

- Мощный короткий импульс возбуждающих частиц ( гамма, электроны, протоны, ....)
- □ Исследование ПДР под действием разных частиц в едином эксперименте
- □ Использование метода совпадений для быстрых продуктов реакций
- □ Корреляционные измерения задержанного гамма-распада
- □ Исследование нестабильных изотопов и изомеров наработка лазером
- □ Исследование переходов с высокой мультипольностью закрученные фотоны

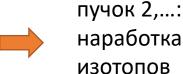


## Ядерная резонансная флюоресценция



необходимые энергии гамма-квантов 0-15 МэВ □ позволяет получать точную информацию о возбужденном состоянии □ перестраиваемость комптоновского источника позволит сильно увеличить точность измерений гамма-кванты поляризованы – правила отбора

Наличие нескольких пучков открывает возможность проведения более сложных экспериментов





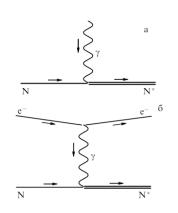
пучок 1,...: проведение ЯРФ

## Исследования ядерных изомеров

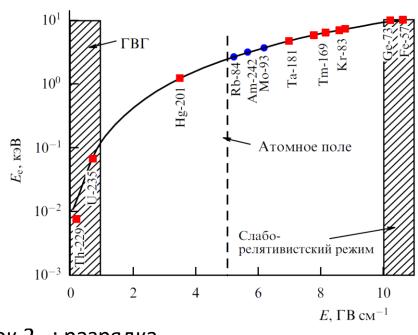
Метастабильные состояния ядра с большим временем жизни (наносекунды и выше) Энергия состояний – от 8 эВ до единиц МэВ

#### Каналы возбуждения:

- Однофотонное возбуждение (рентген, гамма)
- □ Неупругое рассеяние электронов
- Возбуждение электронами через атомную оболочку (обратная внутренняя электронная конверсия и др.)
- Возбуждение лазерным излучением через атомную оболочку Phys.Rev/ A 99 013422 (2019)
- □ Прямое (многофотонное??) возбуждение ядра лазерным излучением?



Возбуждение ядерных изомеров при ГВГ



пучок 2...: разрядка изомеров



пучок 3...: наработка изотопов

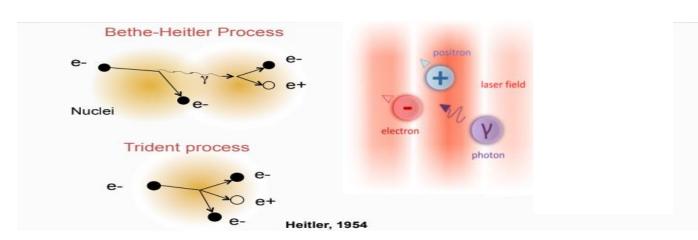


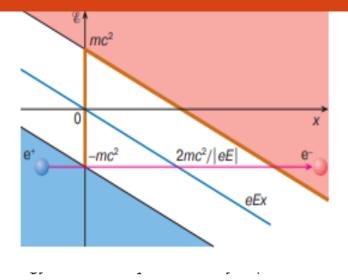
пучок 1...: возбуждение изомеров

## Новые подходы

□Формирование сверхинтенсивных потоков гамма-излучения при «пробое вакуума» □Встречное ускорение пучков адронов □Прямое воздействие лазерного излучения на ядро (возбуждение ядер, ускорение распада?) □????

## Генерация позитронов

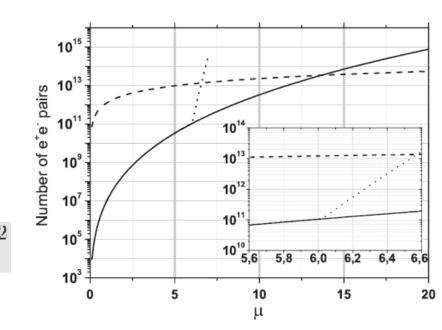




$$eE_sl_c = m_0c^2$$

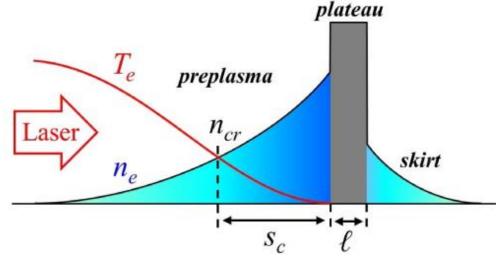
$$eE_{S}l_{c}=m_{0}c^{2}$$
 
$$E_{S}=rac{m^{2}c^{3}}{e\hbar}=1.32\cdot10^{16}~{
m B/cm}$$

$$I_S = (c/4\pi)E_S^2 = 4.65 \cdot 10^{29} \text{ Bt/cm}^2$$



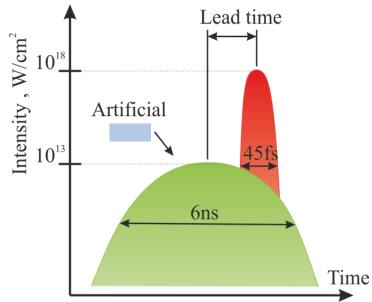
## Лазерно-плазменный ускоритель МГУ

- ✓ Controlled energy deposition plasma plume velocity control
- ✓ Controlled timing plasma plume extent control
- ✓ Different wavelengths feasibility of optical diagnostics



#### **Laser pulse parameters (Ti:Sapphire):**

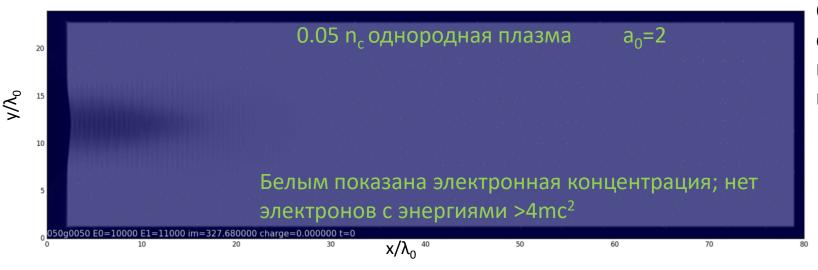
$$au_p = 45 \pm 5 \, fs; \ \lambda = 800 \, nm;$$
 $10 \, Hz; \ up \ to \ 50 \, mJ; \ M^2 = 1.4$ 
 $I_{max} > 5*10^{18} \, W/cm^2; \ contrast \ 10^8.$ 



#### **Laser pulse parameters (Nd:YAG):**

 $au_p = 6 \text{ ns}; \ \lambda = 532 \ (1064) \text{ nm};$ (locked with Ti:Sa, accuracy ~ 1ns);  $E_p = 70 \ (230) \text{ mJ}; \ I \sim 10^{12} \text{ W/cm}^2.$ 

# Формирование коллимированных электронных пучков с большим зарядом в режиме DLA



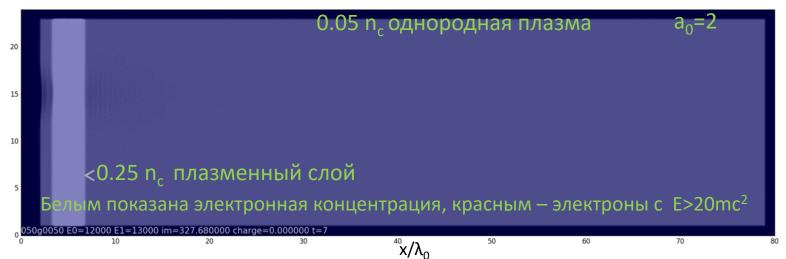
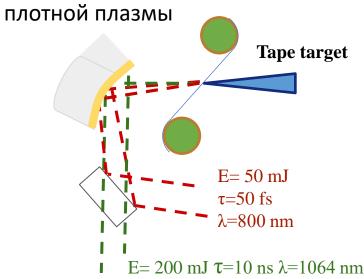


Схема с инжекцией в плазменный канал за счет распада волн параметрических неустойчивостей в тонком слое более



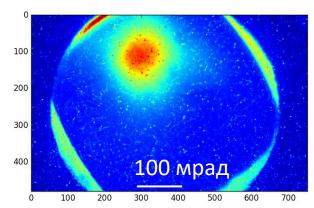
*Plasma Phys. Control. Fusion*. 2019. Vol. 61, № 7. P. 075016

*Plasma Phys. Control. Fusion*. 2021. Vol. 62, № 2. P. 02201

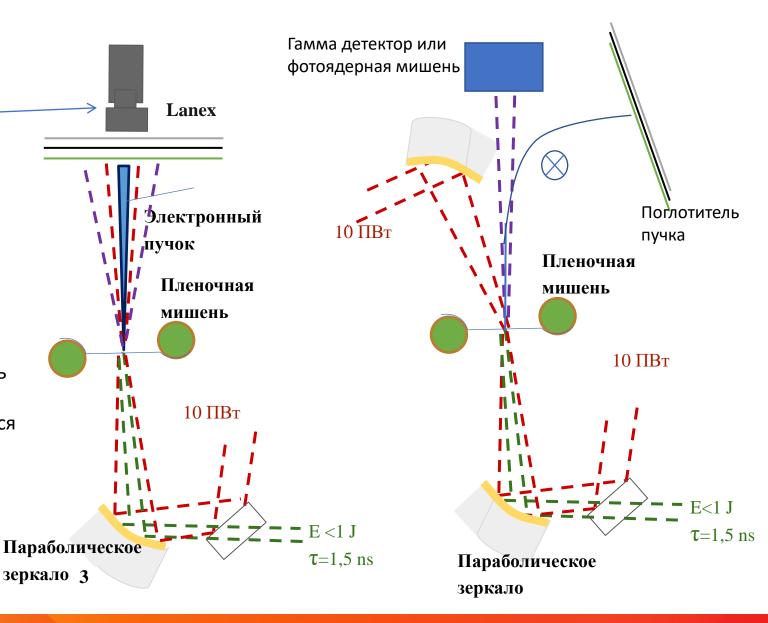
**Physical Review E** 2020, 102(6), 063206

### DLA с использованием пленочных мишеней и/или плотных газовых струй

#### 1 ТВт (50 мДж, 50 фc) 100 пКл (E>2MэB)

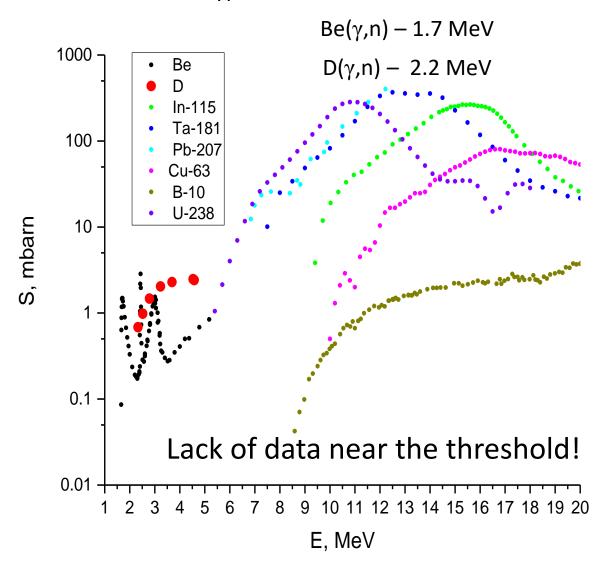


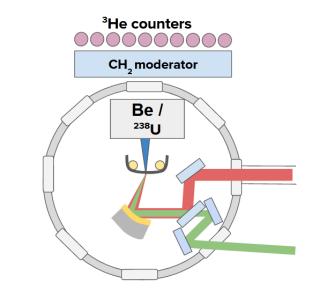
- Схема эксперимента с тонкой пленочной мишенью: электроны ускоряются в плазме, созданной отдельным наносекундным импульсом.
- Ожидаемая эффективность **1-2 нКл/Дж**, плотность плазмы 0,01-0,1 критической
- Если добавить встречный лазерный пучок получается схема обратного Комптоновского рассеяния.
- Меняя энергии электронного пучка можно перестраивать энергии пучка гамма квантов, и измерять сечения фотоядерных реакций вблизи порога (1,7-12МэВ).
- Энергии электронов 300-900 МэВ

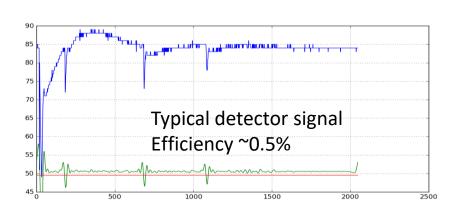


## Фотоядерные реакции

Typical reactions threshold: < 10 MeV







## Neutron generation using Be, U and Pb photodisintegration

 $^9$ Be+  $\gamma \rightarrow n$ +  $^8$ Be

Up to 15 registered neutrons per pulse

**Neutron flux** ~10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup> s<sup>-1</sup>J<sup>-1</sup>

Be(γ,n) cross section\*\*

 $^{238}U+ \gamma \rightarrow n+ ^{237}U$ 

Up to 4 registered neutrons per pulse

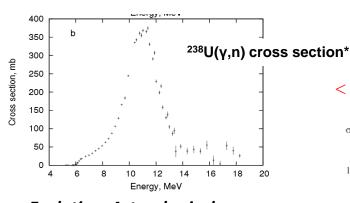
Neutron flux ~10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup>J<sup>-1</sup>

200 200 200 200 200 200 E, MeV

<sup>208</sup>Pb+  $\gamma \rightarrow n$ + <sup>207</sup>Pb

Up to 12 detected neutrons per pulse

**Neutron flux** ~ 10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup> s<sup>-1</sup>J<sup>-1</sup>



 $<\sigma_{vn}> =2.5 \pm 0.5$  mbarn

σ, mb

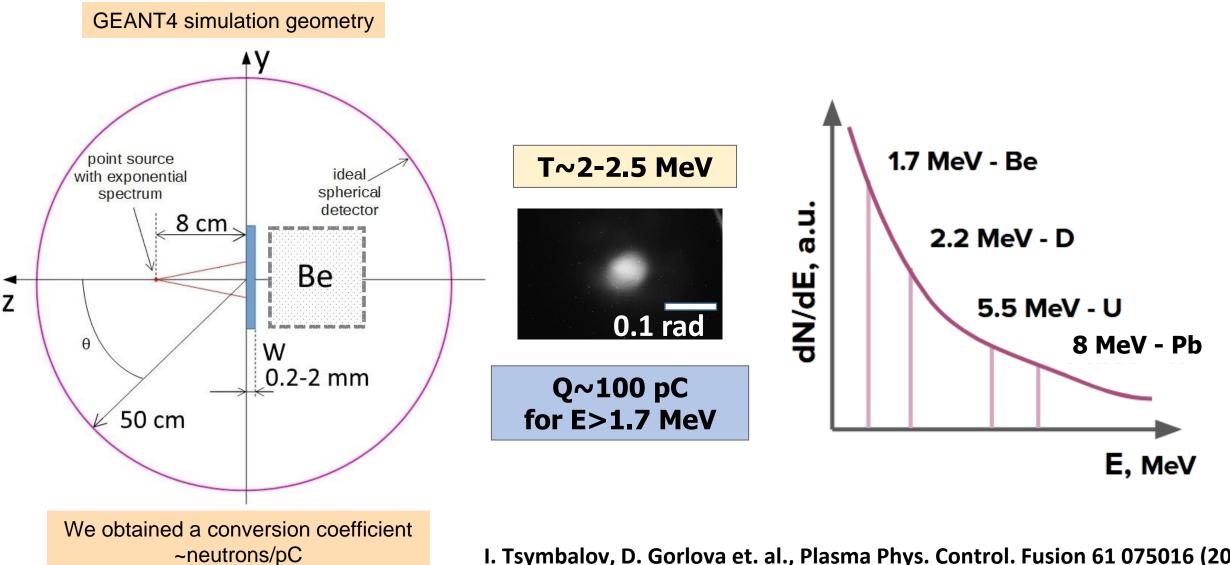
\*Ishkhanov, B. S., et al. "Photonuclear reactions and astrophysics." The Universe Evolution: Astrophysical and Nuclear Aspects" (Nova Science Publishers, New York, 2013)

\*\*Arnold C. W. et al. Cross-section measurement of 9 Be (γ, n) 8 Be and implications for α+ α+ n→ 9 Be in
the r process //Physical Review C. – 2012. – T. 85. – № 4. – C. 044605.

Physics of Atomic Nuclei, 2017 80 397

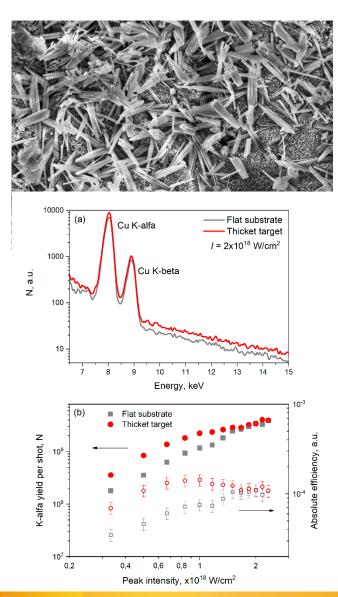
E, MeV

## Photonuclear reactions for e-beam charge measurement



I. Tsymbalov, D. Gorlova et. al., Plasma Phys. Control. Fusion 61 075016 (2019)
D. Gorlova et al 2019 Proc. SPIE 11037, 110370H

## X-ray phase contrast imaging using thicket copper target





# Спасибо за внимание! RLP



