

Zarys programu IFPiLM związanego z ELI-NP i ELI-Beamlines

Jan Badziak

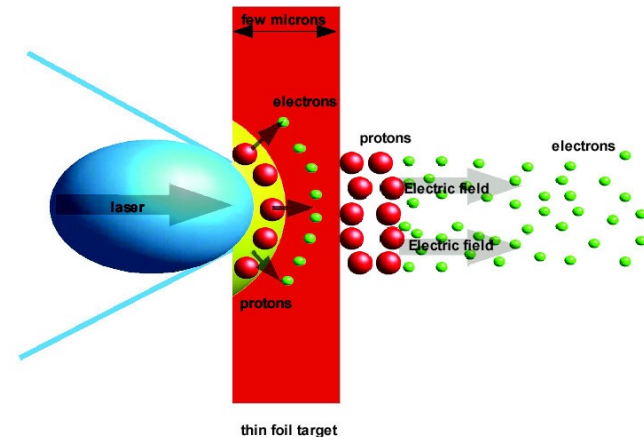
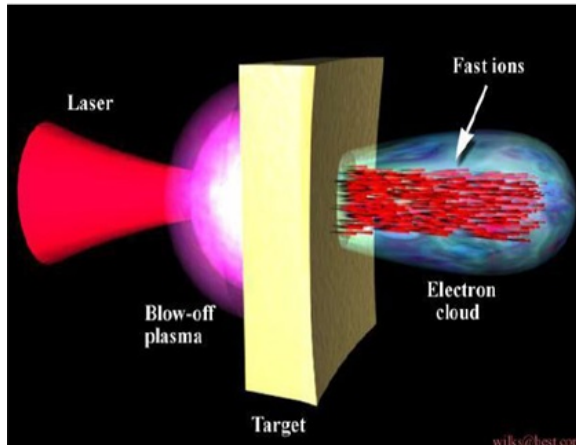
Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy

Cele programu

- Poznanie fizyki **ultra-intensywnych oddziaływań laser-plazma**, w szczególności w kontekście laserowej akceleracji cząstek.
- Zbadanie możliwych **mechanizmów laserowej akceleracji jonów**, a głównie ciężkich jonów, w obszarze ultra-relatywistycznych natężeń promieniowania laserowego oraz zaproponowanie skutecznych **metod/schematów akceleracji** dla natężeń dostępnych na urządzeniach ELI-NP i ELI-Beamlines.
- Rozwój **kodów numerycznych** oraz **metod pomiaru** parametrów intensywnych strumieni jonów (m.in. ciężkich jonów) generowanych przy ultra-relatywistycznych natężeniach.
- **Kształcenie** kadry.
- Przygotowanie **projektów eksperymentów** na urządzeniach ELI-NP i ELI-Beamlines oraz udział w ich przeprowadzeniu.

- **Laserowa akceleracja wiązek jonów** impulsem laserowym o ultra-wysokim natężeniu dla eksperymentów fizyki jądrowej, a między innymi:
 - intensywnych **wiązek jonów Th** dla wytwarzania ciężkich jąder o dużej liczbie neutronów,
 - **wiązek protonów** dla wytwarzanie mezonów π i leptonów μ .
- **Mezony π i leptoni μ** wytwarzane w plazmie i innych ośrodkach wiązkami elektronów i protonów generowanymi impulsem laserowym o ultra-wysokim natężeniu.
- Laserowa akceleracja wiązek protonów i jonów C dla **hadronowej terapii nowotworów**.
- **Generacja wiązek elektronów** metodą LWFA.

Laserowy Akcelerator Jonów



Natężenie pola przyspieszającego (w plazmie) $E_{acc} \approx 1 - 10 \text{ GV/cm}$

Energia jonu E_i

Minim. droga akceleracji L_{acc}

1 MeV $\rightarrow \sim 0.01 \text{ mm}$

1 GeV $\rightarrow \sim 1 \text{ mm}$

1 TeV $\rightarrow \sim 1 \text{ m}$

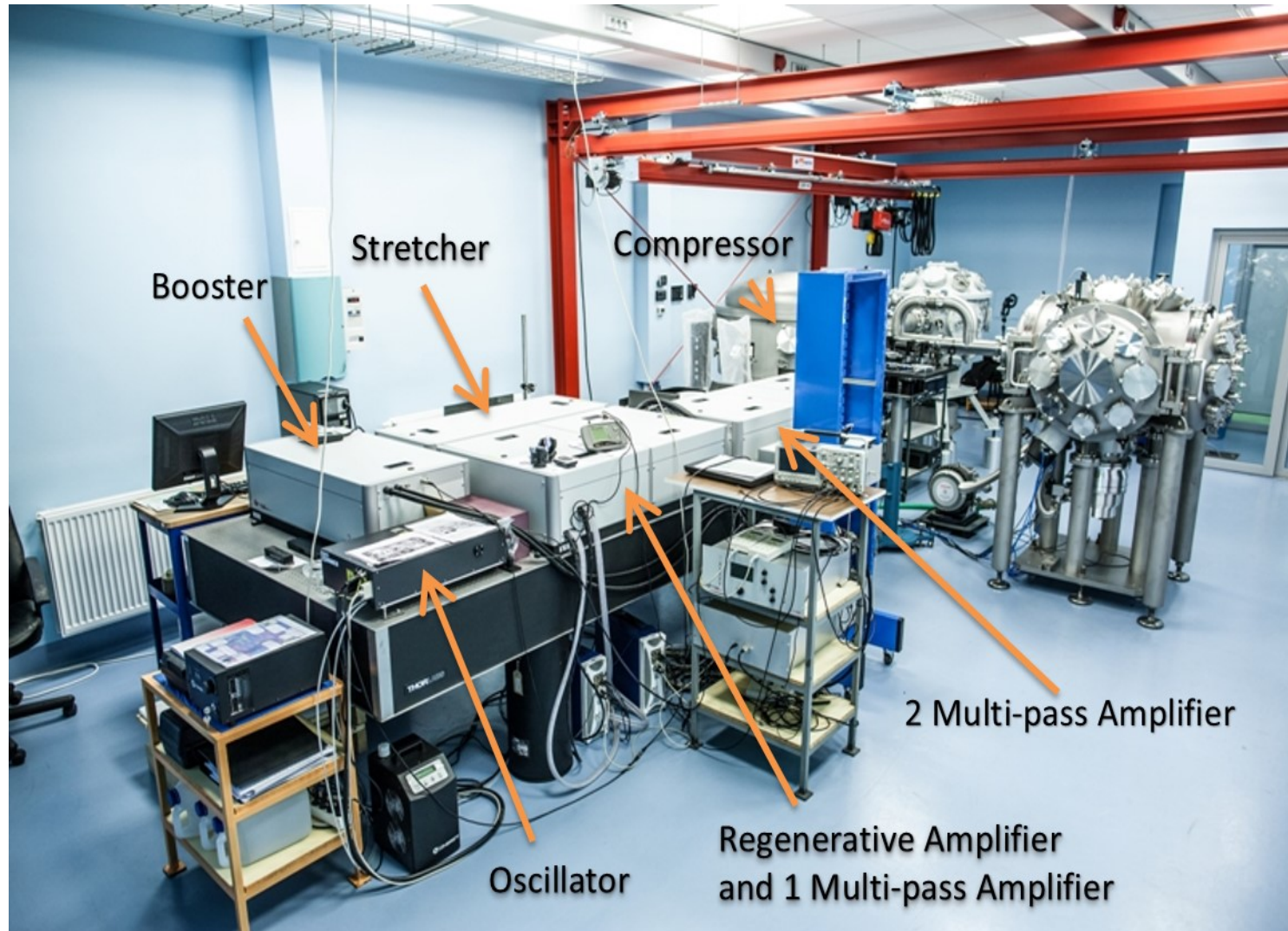
Inne zalety:

- bardzo duża gęstość, fluencja i natężenie wiązki jonów
- bardzo krótki czas trwania impulsu jonowego (piko- lub femtosekundowy)

Główne wady:

- stosunkowo szerokie widmo energetyczne

Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy w IFPiLM

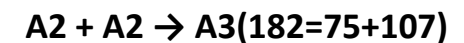
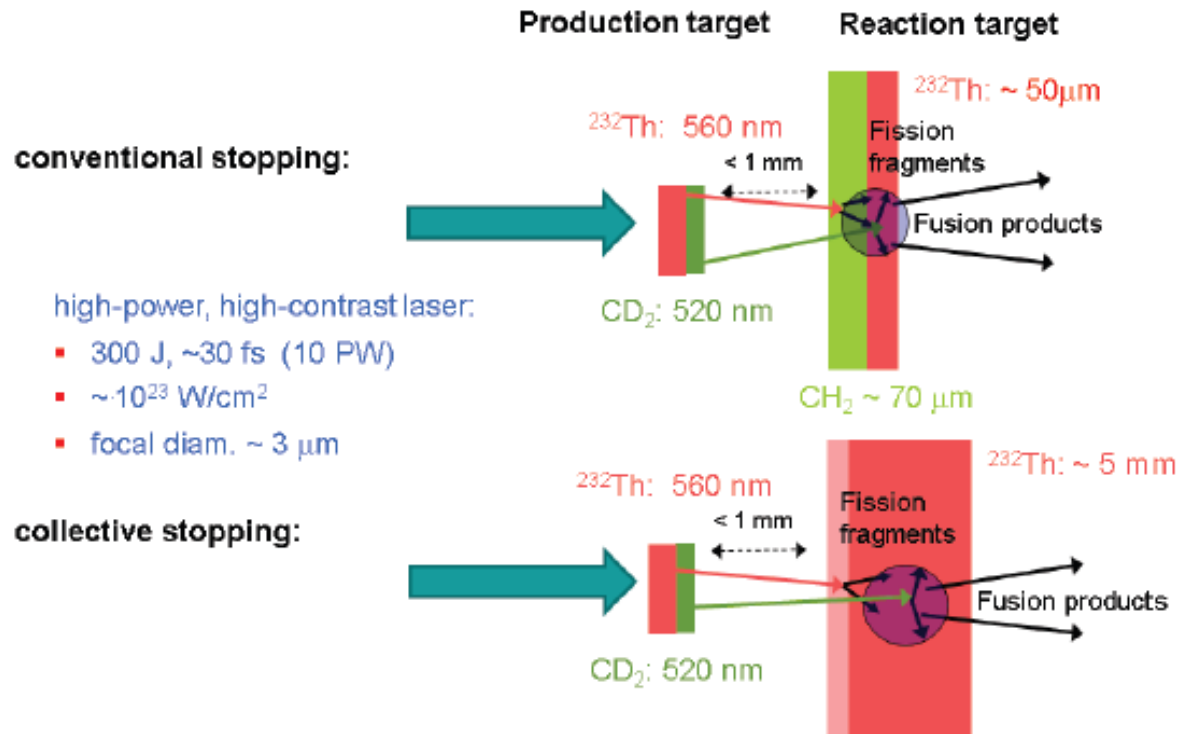


Laser Femtosekundowy Pulsar 10 TW

w Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy IFPiLM

- Energia impulsu 500 mJ
- Czas trwania impulsu 40 fs
- Moc w impulsie >10 TW
- Natężenie promieniowania 10^{19} W/cm^2
- Częstotliwość impulsów 10 Hz
- Centralna długość fali 812 nm
- Kontrast ns $> 10^9$

Wytwarzanie ciężkich jąder o dużej liczbie neutronów w procesach rozszczepienie-synteza z wykorzystaniem wiązek jonów toru ^{232}Th – propozycja eksperymentu na laserze ELI-NP



Wymagane parametry wiązek jonów: $E_i/A \approx 7 \text{ MeV/u} \rightarrow E_{iTh} \approx 1.6 \text{ GeV}$, $E_{iC} \approx 84 \text{ MeV}$, $E_{id} \approx 14 \text{ MeV}$,
 $N_i \sim 10^{11}$, $F_i \sim 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, $I_i > 10^{20} \text{ W/cm}^2$

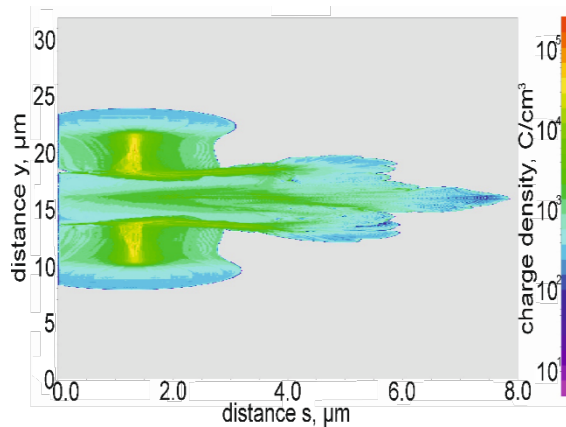
Wartości I_i , F_i są znacznie wyższe od uzyskiwanych w akceleratorach konwencjonalnych. Szczególnym wyzwaniem są parametry wiązki Th.

Laserowa akceleracja wiązek jonów Th dla wytwarzania ciężkich jąder o dużej liczbie neutronów w procesach rozszczepienie-synteza

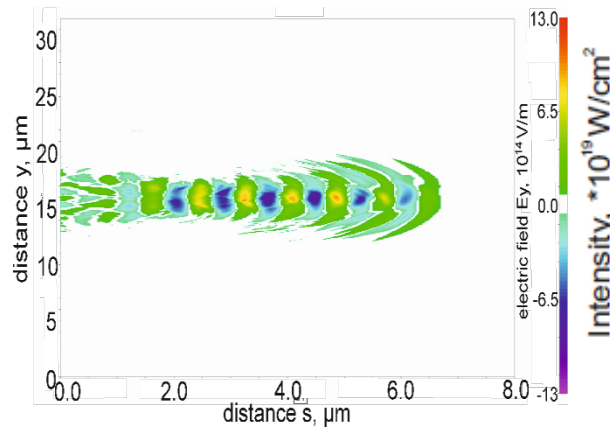
Wyniki symulacji 2D PIC dla akceleratora z laserem **ELI-NP**: $I_L = 10^{23} \text{ W/cm}^2$, $\tau_L = 30 \text{ fs}$, $P = 10 \text{ PW}$

Wymagania dla wiązki jonów toru: $E_i \approx 1.6 \text{ GeV}$, $N_i \sim 10^{11}$, $F_i \sim 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, $I_i > 10^{20} \text{ W/cm}^2$

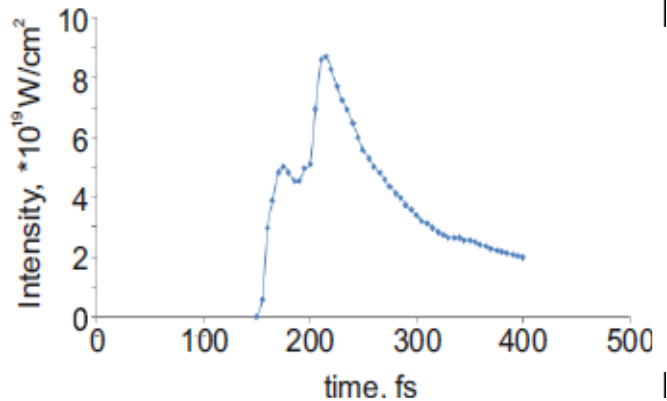
a. rozkład gęstości ładunku jonów Th



b. rozkład natężenia pola Ey



c. kształt czasowy impulsu jonowego



Uzyskane parametry wiązki jonów Th:

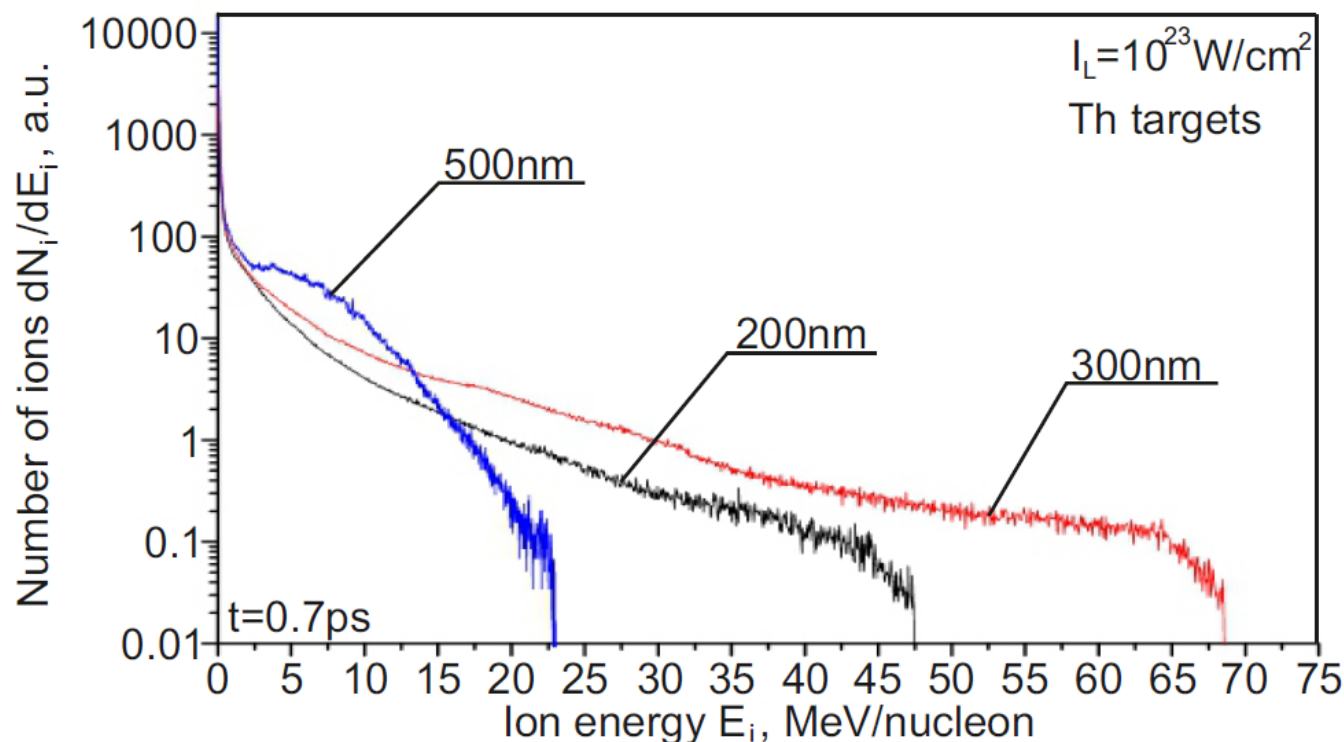
$E_{i \text{ max}} \approx 11 \text{ GeV}$, $E_i \approx 0.5 \text{ GeV}$, $N_i(5 \text{ MeV/n}) \approx 4 \cdot 10^{10}$, $F_i(>5 \text{ MeV/n}) \approx 1.1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, $I_i \approx 8 \cdot 10^{19} \text{ W/cm}^2$,

Laserowa akceleracja wiązek jonów Th dla wytwarzania ciężkich jąder o dużej liczbie neutronów w procesach rozszczepienie-synteza

Wyniki symulacji 2D PIC dla akceleratora z laserem **ELI-NP**: $I_L = 10^{23} \text{ W/cm}^2$, $\tau_L = 30 \text{ fs}$, $P = 10 \text{ PW}$

Widmo energetyczne jonów Th generowanych z tarcz o różnej grubości

Wymagania dla wiązki jonów toru: $E_i \approx 1.6 \text{ GeV}$, $N_i \sim 10^{11}$, $F_i \sim 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, $I_i > 10^{20} \text{ W/cm}^2$

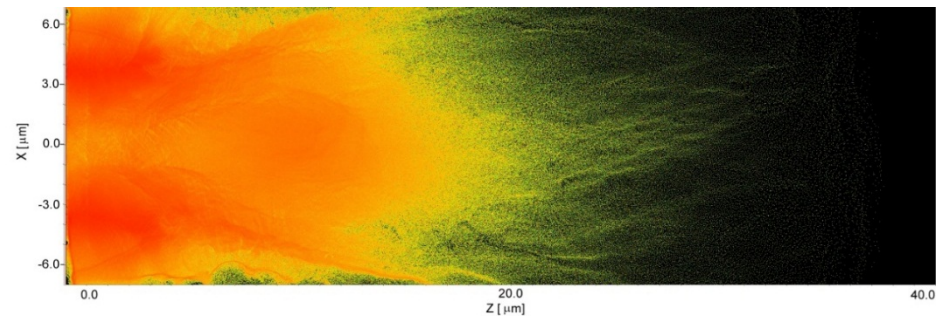
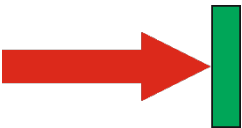
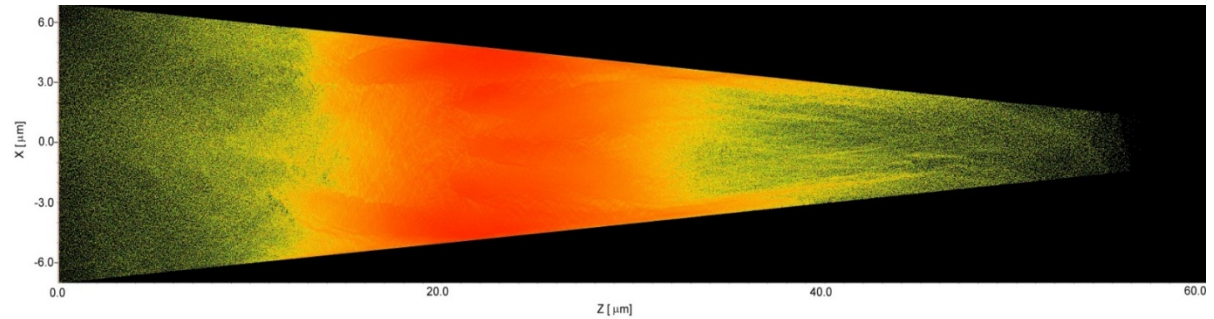
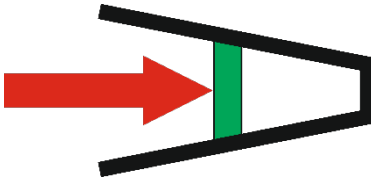
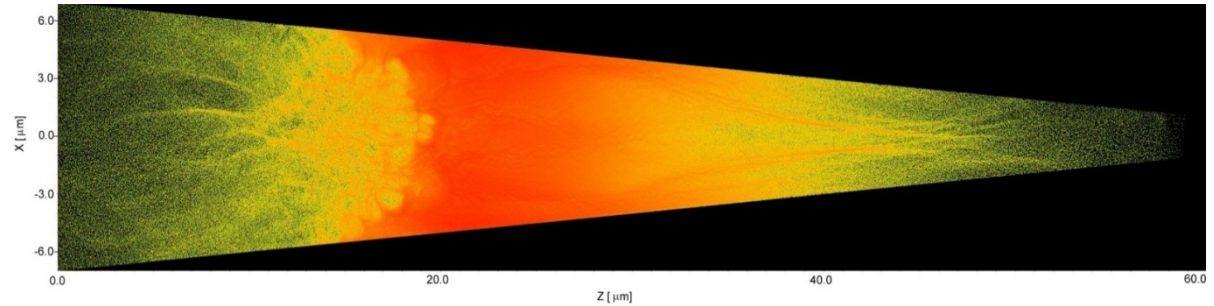
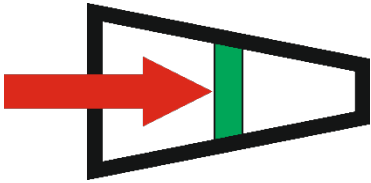


Parametry wiązki jonów Th z tarczy o grubości 300nm:

$E_{i \text{ max}} \approx 16 \text{ GeV}$, $E_i \approx 0.8 \text{ GeV}$, $N_i(5 \text{ MeV/n}) \approx 8 \cdot 10^{10}$, $F_i(>5 \text{ MeV/n}) \approx 2.2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, $I_i \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ W/cm}^2$

Laserowa akceleracja jonów w układach złożonych

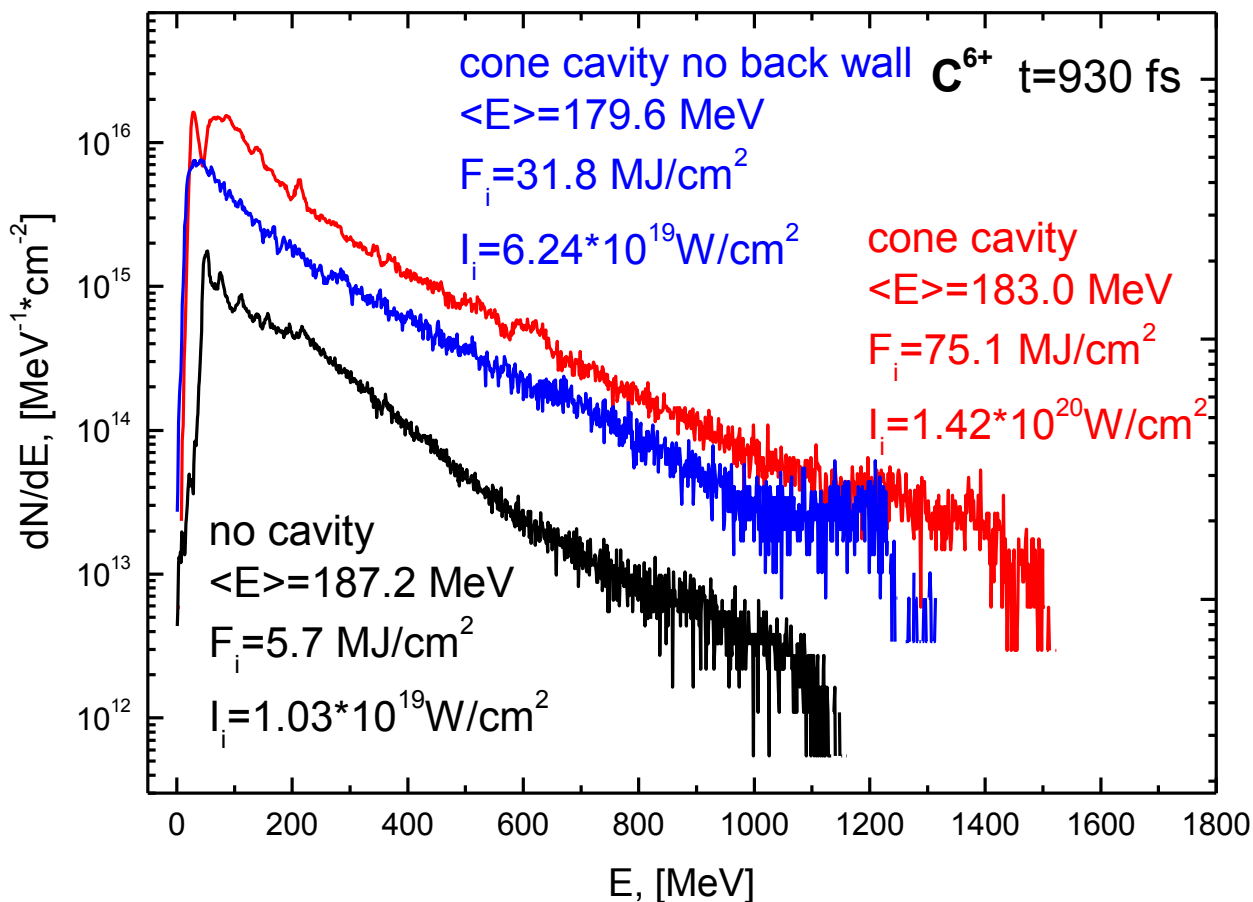
Rozkłady gęstości jonów C przyśpieszonych w układzie LICPA (góra), układzie stożkowym bez wnęki (środek) i w układzie z tarczą płaską (dół). $I_L = 10^{22} \text{ W/cm}^2$, $\tau_L = 100 \text{ fs}$, $L_T = 100 \text{ nm}$



Laserowa akceleracja jonów w układach złożonych

Widmo energetyczne jonów C przyśpieszonych w układzie LICPA (czerwone), układzie stożkowym bez wnęki (niebieskie) i w układzie z tarczą płaską (czarne).

$$I_L = 10^{22} \text{ W/cm}^2, \tau_L = 100 \text{ fs}, L_T = 100 \text{ nm}$$



Fluencja i natężenie wiązki jonów z układu stożkowego jest sześciokrotnie wyższa, a z układu LICPA ponad dwunastokrotnie wyższa niż z tarczy płaskiej.

Laserowa Akceleracja Jonów/Protonów dla Hadronowej Terapii Nowotworów

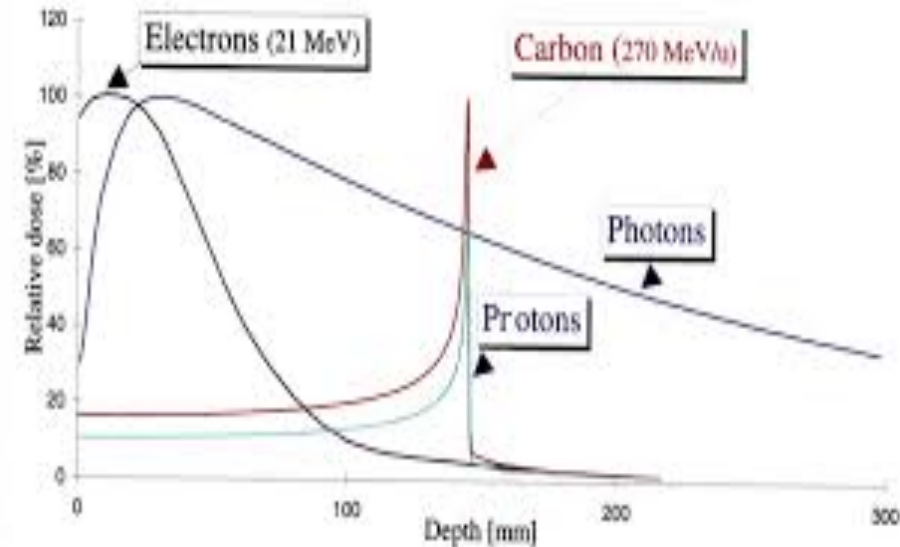
W hadronowej terapii nowotworów wykorzystywane są monoenergetyczne **wiązki protonów** o energii **50 – 250 MeV** lub **wiązki jonów węgla** o energii **1 - 5 GeV**.

Wiązki protonów lub jonów węgla są zwykle wytwarzane w **cyklotronach**.

Urządzenia do hadronowej terapii z cyklotronami są **złożone, duże i bardzo drogie**.

W świecie funkcjonuje ok. **30** takich urządzeń.

Dla zabezpieczenia potrzeb, takich urządzeń powinno być **~ 100 razy więcej**.



The graph of different types of radiation distribution inside human body.

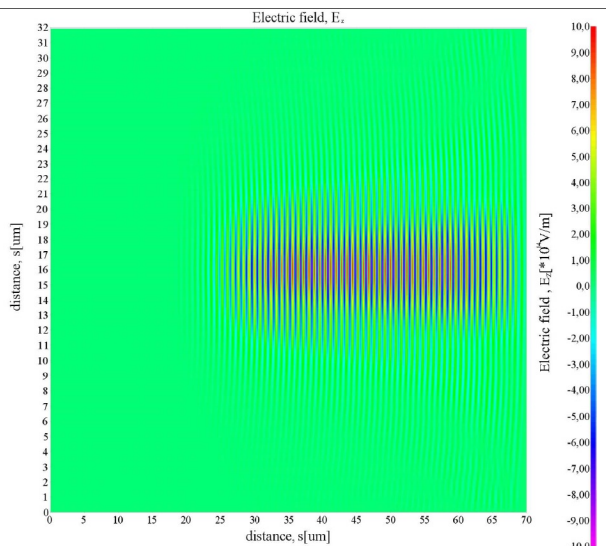
Akseleratory laserowe stwarzają szansę **zmniejszenia złożoności i rozmiarów** urządzeń do hadronowej terapii oraz **znacznego obniżenia ich kosztów**.

Laserowa akceleracja jonów/protonów dla potrzeb hadronowej terapii jest jednym z głównych zagadnień badawczych programu ELI-Beamlines.

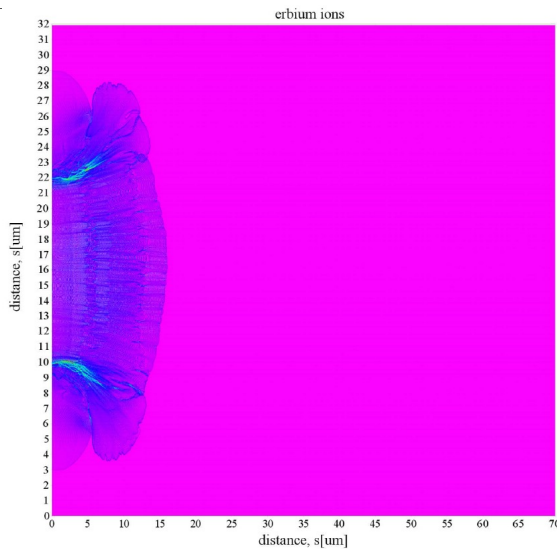
Laserowa Akceleracja Jonów/Protonów dla Hadronowej Terapii Nowotworów

Symulacje 2D PIC: tarcze ErH_3 , $L_T=50nm$, $I_L=1.4 \times 10^{23} W/cm^2$, $\tau_L=130fs$,
 $\lambda=800nm$, polaryzacja kołowa (akcelerator z laserem *ELI-Beamlines*)

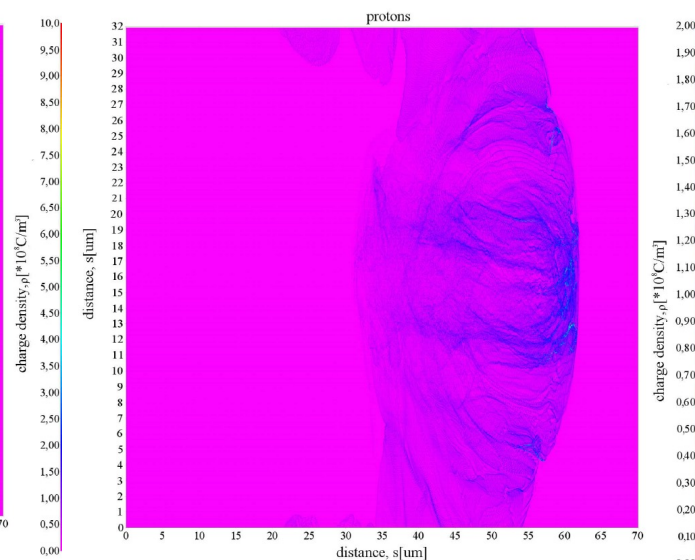
Rozkład pola lasera
 $t = 250$ fs



Rozkład gęstości ładunku Er
 $t = 250$ fs



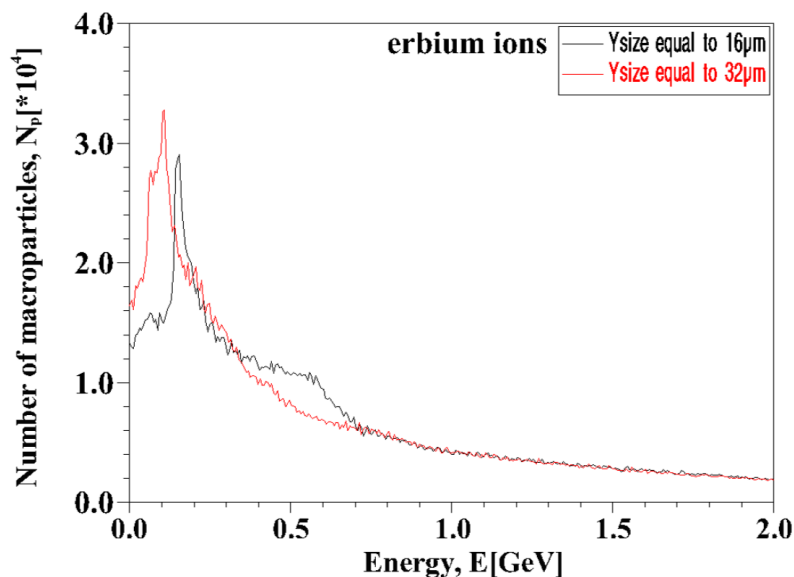
Rozkład gęstości protonów
 $t = 250$ fs



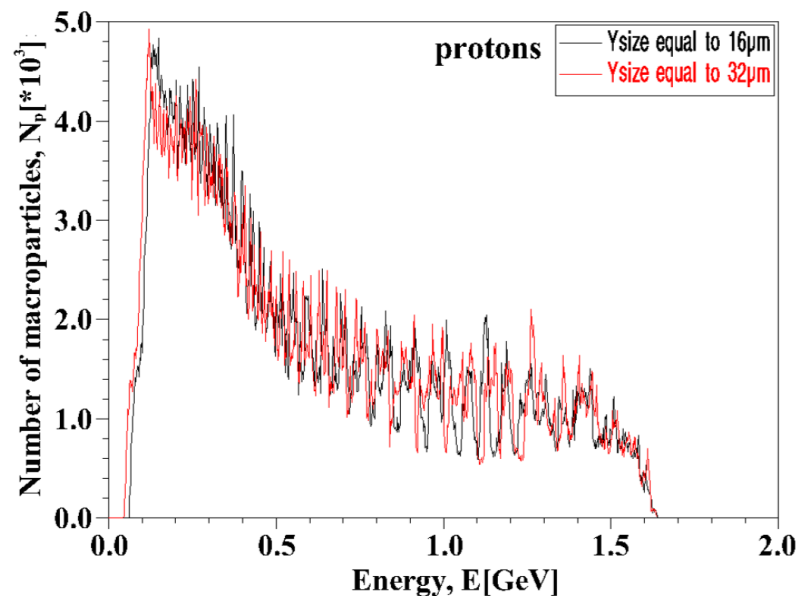
Laserowa Akceleracja Jonów/Protonów dla Hadronowej Terapii Nowotworów

Symulacje 2D PIC: tarcze ErH_3 , $L_T=50\text{nm}$, $I_L=1.4\times 10^{23}\text{W/cm}^2$, $\tau_L=130\text{fs}$, $\lambda=800\text{nm}$, polaryzacja kołowa (akcelerator z laserem *ELI-Beamlines*)

Widmo energetyczne jonów Er
 $t = 250\text{ fs}$



Widmo energetyczne protonów
 $t = 250\text{ fs}$

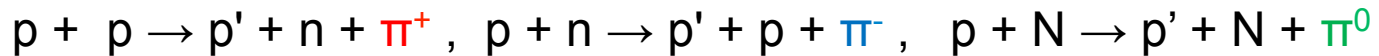


Parametry lasera ELI są wystarczające (z nadmiarem) dla uzyskania energii protonów wymaganych dla hadronowej terapii nowotworów ($\sim 0.2\text{ GeV}$). Należy znaleźć sposób (mechanizm) umożliwiający znaczne zawężenie widma energetycznego protonów.

Parametry wiązek protonów wytwarzanych laserem ELI, a w szczególności energie protonów są wystarczające dla efektywnej generacji mezonów π i leptonów μ w plazmie.

Mesons π and leptons μ produced in plasma with ultra-intense laser beams

Pion production through the laser-accelerated protons:



The threshold for pion production of **free nucleons** is **290 MeV**, but it is smaller for heavier targets - only **140 MeV** for p - ^{14}N interaction. It is further reduced if the projectile itself is a heavier ion: it is **23 MeV/nucleon** for ^{12}C incident on ^{12}C , which is well within the foreseen capabilities.

π^0 have lifetime of 0.08 fs and decay mainly to two gammas.

Much more interesting are **charged pions**: $\pi^{+/-}$ have lifetime of **26 ns**, which is long relative to the laser pulse, and they decay mainly to $\mu^{+/-}$ **leptons** with the lifetime of **2.2 μs** .

The advantages of the **laser** as a source of pions are the **large particle fluxes** that may be generated and a **short duration** of the particle pulse.

Negative pions are of particular interest, as they may **replace electrons** on atomic orbits, giving rise to **exotic atoms**. The Bohr radius in a π^-p system is 216 fm, compared to 5.3×10^4 fm for hydrogen. The properties of such exotic atoms are **sensitive to strong interactions** and offer an opportunity to study these interactions at **very low energies**. The reduced dimension of the muonic or pionic hydrogen offer an interesting possibility of an enhancement in the DT fusion reactions. The **muon-catalyzed fusion** was extensively investigated in cold matter, with ELI lasers we may get the possibility to investigate this effect and the **pion-catalyzed fusion** in laser **plasma**.

Laser Wake Field Acceleration of Electrons

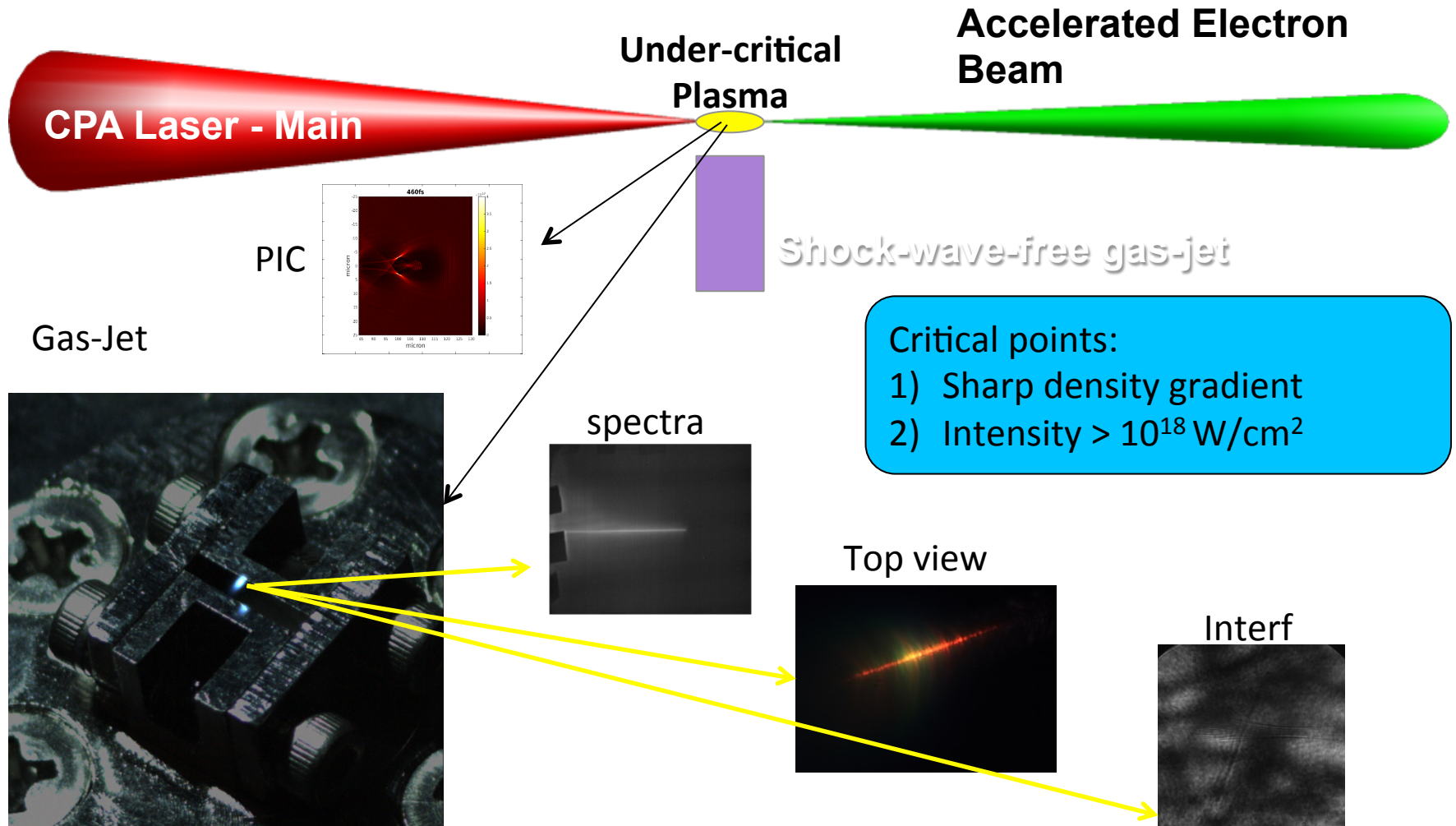
The main problem in LWF Accelerator is the stability of the produced beam, as it is widely reported in literature the laser-plasma accelerated electron suffer of

- 1) Pointing instability on the level of «few mrad»
- 2) Average near-monochromatic energy fluctuation of 20%rms
- 3) Minimal energy spread over «few %rms»

In the ELI Beamline HELL project all these problems are of high interest and the main approach to solve/minimize them is to attach them separately.

In the first electron acceleration experiment done at **the IPPLM Laboratory** we attached the first problem - **the pointing stability**.

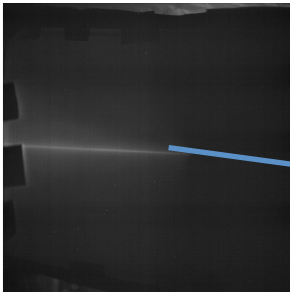
Conceptual scheme for LWFA



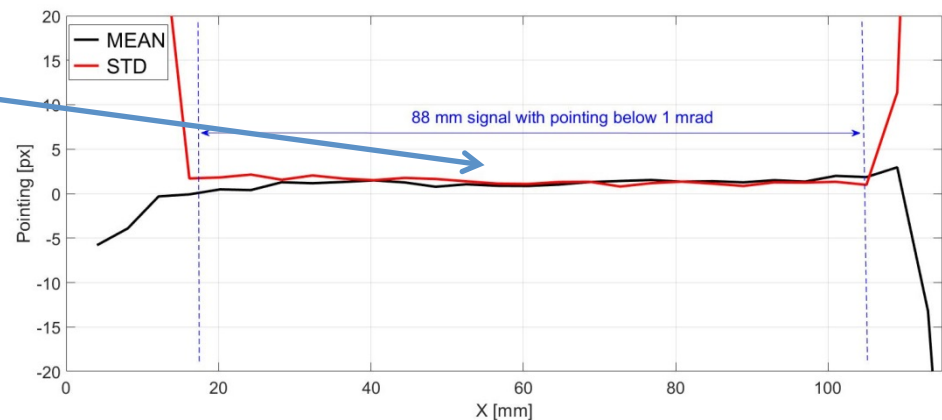
Laser Wake Field Acceleration of Electrons

Preliminary results at IPPLM - Warsaw

Electron spectra



Superstable vertical pointing! $\ll 1\text{ mrad!!!}$



The LANEX signal shows the electron beam deflected by permanent dipole magnets. These electrons cover a range up to tens of MeV ($<30\text{ MeV}$) and in this specific configuration show a «white spectra» as expected by PIC simulations.

The MAIN result is that, shot after shot, the non-deflected vertical position of the electron signal is very reproducible well below 1 mrad (typical best level obtained nowadays is few mrad!), over the entire range of energies.

- **Proponowany program dotyczy zagadnień stanowiących istotne elementy programów badawczych zarówno ELI-NP jak i ELI-Beamlines.**
- **Dla pomyślnej realizacji programu niezbędne jest wsparcie zespołu IFPiLM przez fizyków jądrowych m. in. w kwestiach dotyczących przebiegu procesów jądrowych w proponowanych eksperymentach ELI-NP, sprecyzowania parametrów wiązek jonów wymaganych w rozważanych reakcjach jądrowych, określenia metod pomiaru produktów reakcji itp.**
- **Weryfikacja koncepcji i wyników symulacji numerycznych oraz proponowanych metod pomiarowych wymaga przeprowadzenia eksperymentów na istniejących układach laserowych, w tym na jednym z dużych (PW-owych?) laserów europejskich (CETAL, PHELIX..?).**
- **Realizacja programu nie wydaje się możliwa bez finansowego wsparcie ze środków krajowych (poza dot. statutową) i pokrycia z tych środków kosztów przygotowania i przeprowadzenia wstępnych eksperymentów, a także częściowego pokrycia kosztów osobowych.**