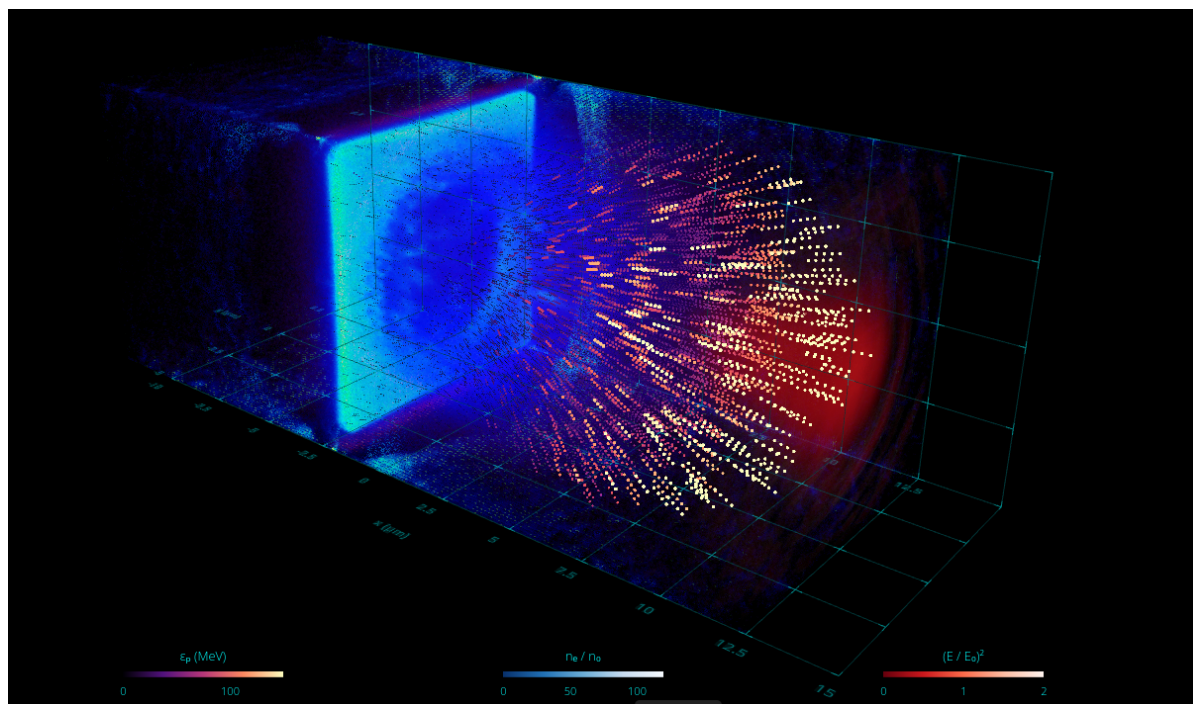


# Simulace urychlování iontů ELI laserem a jejich vizualizace ve Virtuální Realitě

N. P. Sládek\*, M. Bodorík\*\*

Gymnázium Veľká okružná 22, Žilina 01001

[ninkopeter@gmail.com](mailto:ninkopeter@gmail.com)\*, [matik.bodorik@gmail.com](mailto:matik.bodorik@gmail.com) \*\*



Obrázok 0: Vizualizácia konečnej simulácie v prostredí virtuálnej reality.

## Abstrakt:

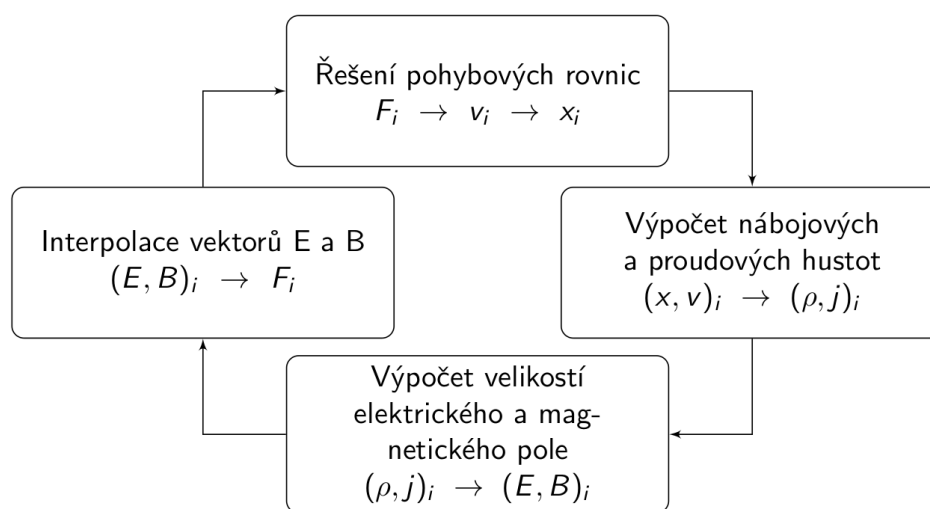
3D simulácia interakcie vysoko-intenzívneho laseru s kryogenickým vodíkom slúžiacim ako terč. Vizualizácia zobrazuje urýchlené protóny, ktoré dosahujú energiu viac ako 200 MeV. Simulácia bola vypočítaná na superpočítači IT4Innovations pomocou kódu EPOCH. Vizualizovanie bolo 3D a boli pozorované mechanizmy Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) a Radiation Pressure Acceleration (RPA).

# 1 Úvod

Urýchľovanie iónov je jedným z popredných výskumných odborov. V rámci nášho projektu sme zavítali do ELI Beamlines v Dolných Bržezanoch neďaleko Prahy. Simulácia urýchľovania iónov na titáno-safírovom lasery ELI Beamlines by nám mala: ukázať a vizualizovať energetické spektrum protónov, priebeh interakcie a rozloženie v priestore. Následný výskum v tomto odbore pomôže v rôznych socioekonomických oblastiach ako sú liečba rakoviny, produkcia izotopov pre PET, generovanie zväzkov neutrónov, diagnostika pamiatok a ďalšie ...

## 2 Materiály a metódy

Začiatok prípravy simulácie urýchľovania iónov laserom spočíval s pochopením základných parametrov pre interakciu laseru s plazmou. Zadané parametre sme spočítali pomocou programu MATLAB a zadali do vstupného súboru pre numerickú simuláciu. Použili sme metódu Particle-in-cell (PIC), ktorá spočíva v tom, že sa simulujú elektrické a magnetické pole na mriežke a voľne pohybujúce sa makročastice. V prvom kroku sa riešia pohybové rovnice definované Lorentzovou silou. V druhom, výpočet hustoty náboja prúdovej hustoty na mriežke. Tretí krok je vypočítanie veľkostí elektrického a magnetického pola riešením Maxwellových rovníc. Štvrtý krok je interpolácia elektrického a magnetického poľa z mriežky na súradnice častíc vo vnútri buniek. Kroky je prehľadne vidno v nasledujúcom diagrame (obr. 1).



Obrázok 1: Výpočetný cyklus metódy PIC. Zdroj [2]

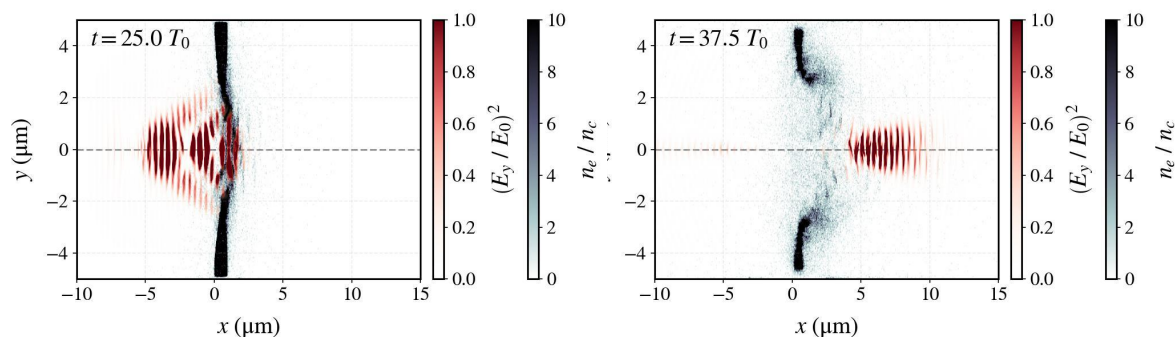
Parametre zadané do simuláci:

Laser - L3 ELI Beamlines		Terč - Kryogénny vodík	
Intenzita	$1 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$	Elektrónová hustota	$5.36 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$
Vlnová dĺžka	800 nm	Elektrónová hustota	$30 \cdot n_c$
Periódá	2,69 fs	Hrúbka	1 $\mu\text{m}$
Šírka zväzku(FWHM)	3 $\mu\text{m}$	Výška	10 $\mu\text{m}$
Dĺžka pulzu	$\sin^2(t)$ 64 fs (Gauss. $\approx$ 30 fs)	Dĺžka	10 $\mu\text{m}$
Kritická hustota ( $n_c$ )	$1.74 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$		

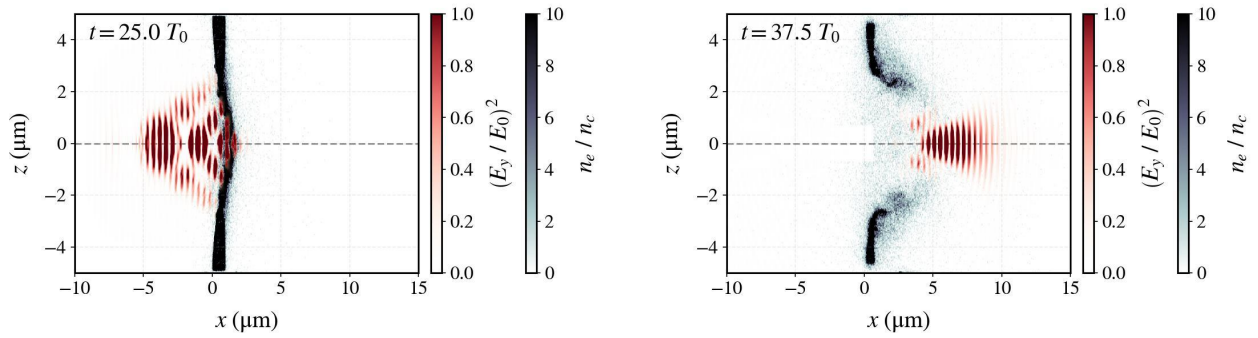
Táto metóda je implementovaná v open-source kóde EPOCH [1], ktorý je napísaný v jazyku Fortran a vyvinutý na Univerzite Warwick. Tento kód umožňuje 1D, 2D a 3D simulácie. V tomto projekte sme použili 3D verziu.

### 3 Simulácia

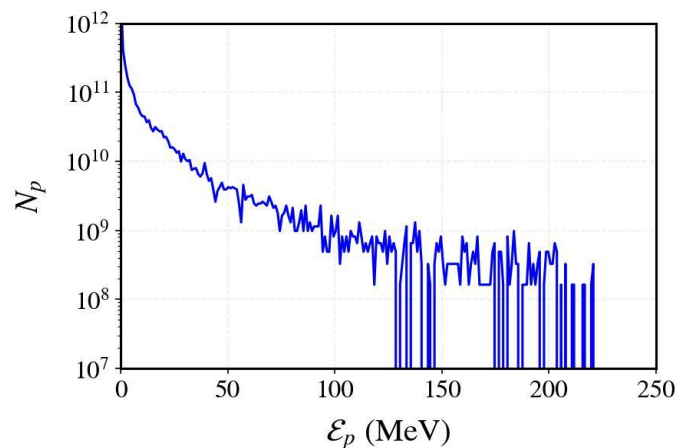
Numerická simulácia kódu EPOCH[1] prebiehala na Ostravskom superpočítači Karolína v centre IT4Innovations , proces zabil na 1024 jadrách 1h na výpočet. Následné dáta sme vizualizovali pomocou programov: ParaView, Jupyter Notebook (obr. 2-4) a VBL aplikácia na virtuálnu realitu (obr. 0).



Obrázok 2: 2D rez 3D simulácie zobrazujúci intenzitu laseru a elektrónovú hustotu vodíkového terča v čase 25 periód  $T$  a v čase 37,5 periód  $T$ . Pohľad so súradnicami  $x$  a  $y$ . V tejto rovine je vidieť efekt polarizácie laserového pulzu, ktorý sa prenáša do hustoty častíc.



Obrázok 3: 2D rez 3D simulácie zobrazujúci intenzitu laseru a elektrónovú hustotu vodíkového terča v čase 25 periód  $T$  a v čase 37.5 periód. Pohľad so súradnicami  $x$  a  $z$ .



Obrázok 4: Energetické spektrum protónov zo simulácie v čase 50 periód  $T$ .

## 4 Zhrnutie

Počas našej dvojročnej práce sa nám podarilo napočítať simuláciu a vizualizovať priebeh interakcie laseru s terčom a energetické spektrum protónov aj vo virtuálnej realite (obr. 0). Daná energia výsledných protónov je vhodná na protónovú terapiu avšak divergencia zväzkov je príliš vysoká.

## Pod'akovanie

Na záver by sme sa chceli poďakovať našim garantom projektu Martinovi Matysovi a Petrovi Valentovi. Ďalej ešte Vojtěchovi Svobodovi, Karlovi Kolářovi a Veronike Hendrychovej za organizáciu Týdne vědy. Simulácia bola umožnená pomocou grantu e-INFRA CZ (ID:90140)

## Referencie

- [1] T. D. Arber, K. Bennett, C. S. Brady, et al., Plasma Phys. Contr. Fus. 57, 113001 (2015)
- [2] Martin Matys. Částicové simulace vlivu složení terče na urychlování iontu ultraintenzivními femtosekundovými laserovými impulzy. Praha, 2014. Bakalárska práca. ČVUT v Praze, FJFI