

Hydrodynamické simulace generování a propagace rentgenového záření v laserovém plazmatu

Martin Šach

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT

vedoucí: doc. Ing. Milan Kuchařík, Ph.D., Katedra fyzikální elektroniky, FJFI ČVUT v Praze

sachmar2@fjfi.cvut.cz

30. června 2021

1 Úvod

- Rentgenový laser
- Simulovaná situace
- Shrnutí dosavadních výsledků
- Cíle současné práce

2 Výpočet gradientu

- Metoda podpůrných operátorů
- Metoda konečných prvků
- Metoda nejmenších čtverců

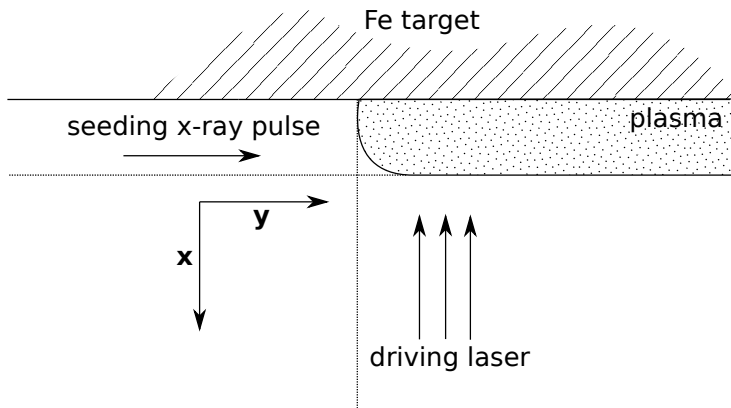
3 Simulace

- Parametry
- Výsledek

4 Co je potřeba dodělat

5 Shrnutí

- Snaha realizovat intenzivní koherentní rentgenový zdroj
- Potenciální aplikace napříč vědními obory
- Různé přístupy:
 - FEL - Free Electron Laser
 - Generace vyšších harmonických (HHG)
 - Plasma jako zesilující médium - **tato práce**
- Simulace - optimalizace procesu



Obrázek: Poloha terče vůči řídicímu laseru a zárodečnému pulzu

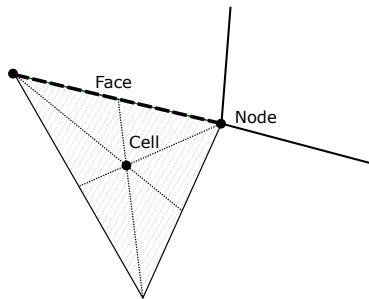
- Byl vytvořen ray-tracing kód a ověřena jeho funkčnost
- Byly implementovány modely výměny energie
 - Rezonanční absorpce
 - Bremsstrahlung
- Byl rozšířen model pro tzv. koeficient zisku na M energetických hladin

Trasování paprsků (ray tracing) - Teoretické předpoklady

- Přiblížení geometrické optiky
- Výchozí rovnice - paprsková rovnice

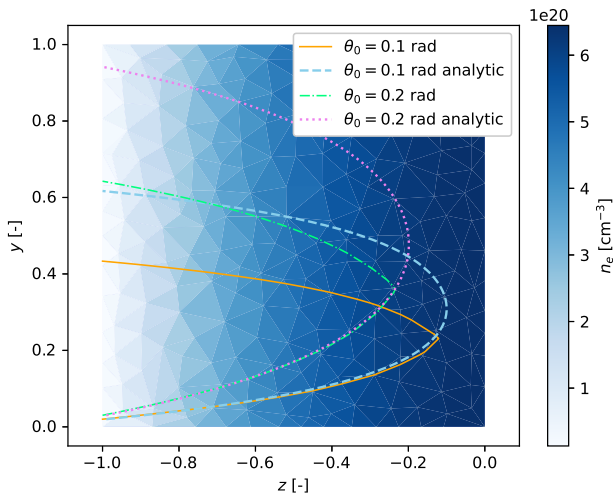
$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \nabla n. \quad (1)$$

- Lagrangeovské souřadnice
- Sít - buňky, uzly, rozhraní, viz obrázek
- Aproximace gradientu na pravé straně rovnice je zásadní



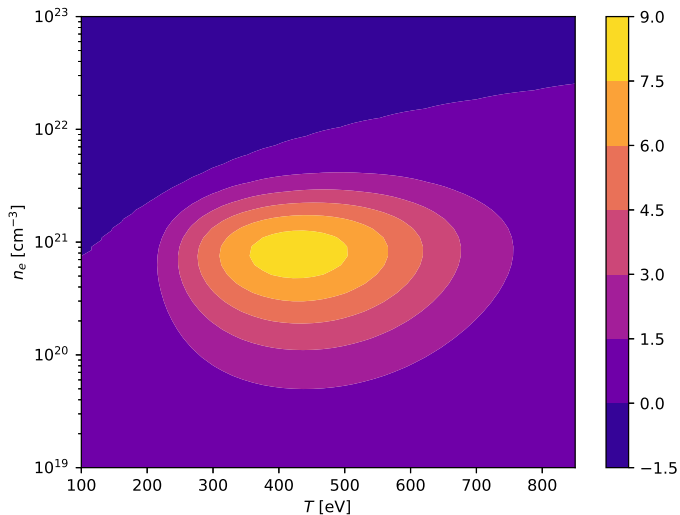
Obrázek: Lagrangeovská síť - definice buňky (cell), uzlu (node) a rozhraní (face)

Shrnutí dosavadních výsledků



Obrázek: Srovnání výsledků ray-tracingu s výsledky získanými numerickou integrací

Shrnutí dosavadních výsledků



Obrázek: Koeficient zisku g jako funkce jedné teploty T a hustoty elektronů n_e

- Ověřit robustnost a konvergenci vyvinuté metody
- Otestovat různé metody výpočtu gradientu
- Implementovat metodu do hydrodynamického kódu
- Provést simulace a s cílem modelovat 2d profil koeficientu zisku
- Provést simulaci zárodečného pulzu a zhodnotit vliv difrakce

- Metoda podpůrných operátorů [3]

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\oint_{\partial S} u dy}{S} \quad (2)$$

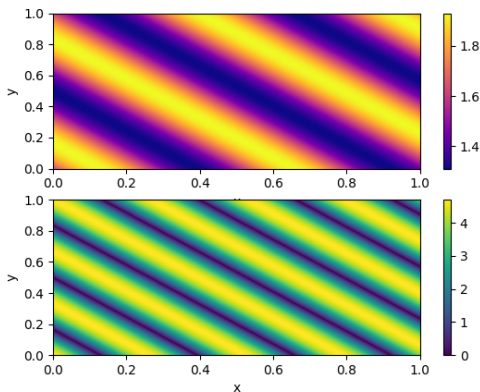
- Formulace v rámci metody konečných elementů [1]

$$\int_{\Omega} G_i \psi_i dV = \int_{\Omega} \frac{\partial u}{\partial x_i} \psi_i dV = - \int_{\Omega} u \frac{\partial \psi_i}{\partial x_i} dV + \oint_{\partial \Omega} u \psi_i n_i dS, \quad (3)$$

- Formulace pomocí metody nejmenších čtverců [2]
 - Předeterminovaný systém lineárních rovnic

Výpočet gradientu - testovací úloha

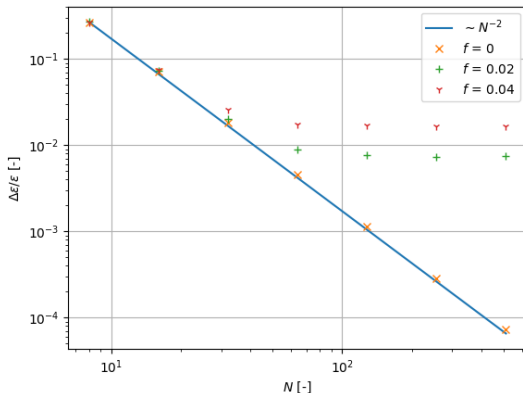
- Lineární funkce $u(x, y) = 2x + 3y$
- Sinová funkce $n_e(x, y) = 1.62 + 0.31 \sin(\pi(3.79x + 2.98y))4$



Obrázek: Analytická funkce použitá pro ověření konvergence metod (nahore) a její gradient (dole)

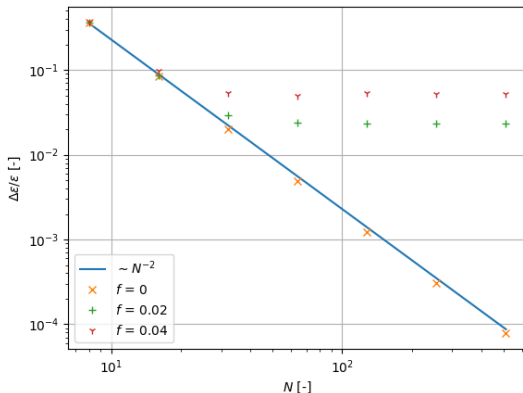
- Čtvercová síť - různý počet segmentů na jedné straně N
- Randomizace - faktor f
- Viz. tabule

Výpočet gradientu - Metoda podpůrných operátorů



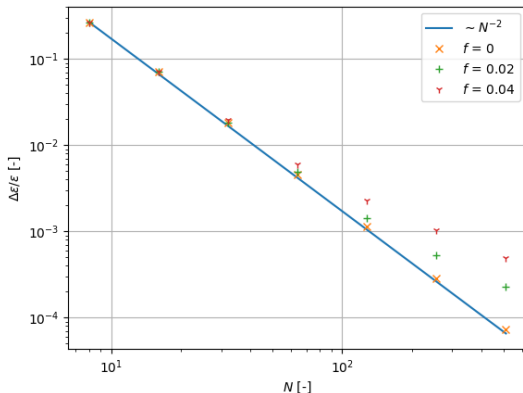
Obrázek: Konvergence metody podpůrných operátorů v závislosti na randomizačním faktoru f (relativní chyba v závislosti na počtu segmentů N)

Výpočet gradientu - Metoda konečných prvků



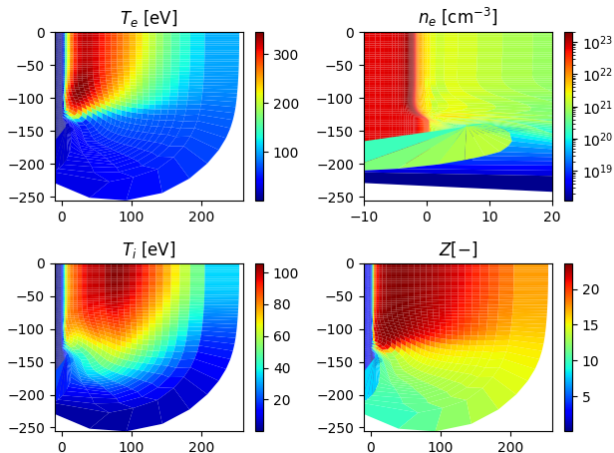
Obrázek: Konvergence metody formulované pomocí metody konečných prvků v závislosti na randomizačním faktoru f (relativní chyba v závislosti na počtu segmentů N)

Výpočet gradientu - Metoda nejmenších čtverců



Obrázek: Konvergence metody nejmenších čtverců použité pro výpočet gradientu v závislosti na randomizačním faktoru f (relativní chyba v závislosti na počtu segmentů N)

- Supergaussovský pulz, $n = 10$, FWHM 200 μm .
- Finální čas 2.59 ns
- Tři pulzy přichozí 1.5 ns, 2 ns, 2.51 ns
- FWHM 1000 ns, 100 ns, 0.5 ns
- El-phononová + SH srážková frekvence
- Umělá viskozita



Obrázek: Výsledky simulace interakce super gaussovského laserového pulzu s železným terčem. Rozměr jsou uvedeny v μm

Co je potřeba dodělat

- Vypočítat koeficient zisku na základě termodynamických veličin
- Použít raytracing na studii difrakce rentgeového pulzu
- Provést řadu simulací s hotovým kódem

- Provedl jsem představení dosavadní práce a představil jsem aktuální cíle
- Věnoval jsem se metodám výpočtu gradientu elektronové hustoty
- Předvedl jsem výsledky simulace
- Shrnul jsem co je třeba ještě dodělat

Děkuji za pozornost



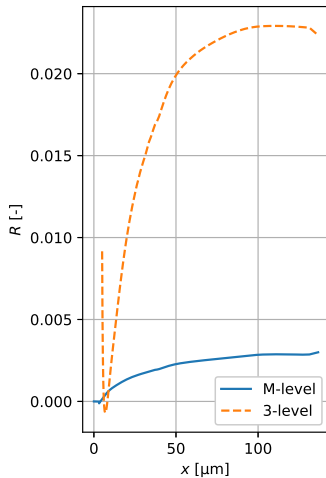
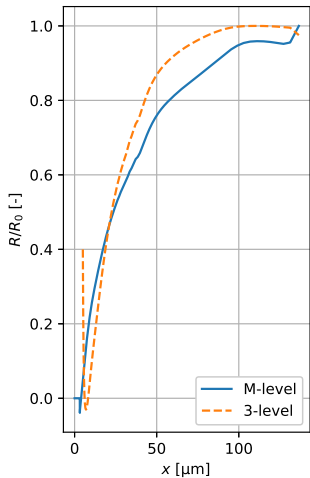
R. Anderson et al. "MFEM: A modular finite element methods library". en. In: *Computers & Mathematics with Applications* (čvc 2020). ISSN: 08981221. DOI: 10.1016/j.camwa.2020.06.009. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0898122120302583> (cit. 08.09.2020).



H. Nishikawa a J. A. White. "An efficient cell-centered finite-volume method with face-averaged nodal-gradients for triangular grids". en. In: *Journal of Computational Physics* 411 (červ. 2020), s. 109423. ISSN: 0021-9991. DOI: 10.1016/j.jcp.2020.109423. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999120301972> (cit. 30.08.2020).



Mikhail Shashkov. *Conservative Finite-Difference Methods on General Grids*. en. Ed. Stanly Steinberg. 2. vyd. CRC Press, ún. 2018. ISBN: 9781315140209. DOI: 10.1201/9781315140209. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781351458306> (cit. 21.04.2021).



Obrázek: Srovnání populací hladin