

Fluidní modelování interakce laserového záření s porézními materiály

Zimní škola fyziky plazmatu a termojaderné fúze - Mariánská 2019

Lubomír Hudec

7. ledna 2019

1) Modelování interakce laserového záření s pevným terčikem

- Eulerovy rovnice
- Lagrangeovské souřadnice & Metoda trasování paprsků

2) Modelování interakce laserového záření s porézním materiálem

- Mikroskopická struktura pěny
- Homogenizace pěny
- Strukturovaný a multiškálový model

3) Návrh modifikace náhodného úhlu odrazu pro 2D metodu trasování paprsků

- Výsledky výzkumného úkolu

4) Zadání diplomové práce a první dosažené výsledky

Modelování interakce laserového záření s pevným terčičkem

Numerické řešení Eulerových rovnic v lagrangeovských souřadnicích

Eulerovy rovnice

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{u} = 0$$

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} + \rho \operatorname{grad} p = 0$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} + p \operatorname{div} \vec{u} + \operatorname{div} \vec{T} = \operatorname{div} (\kappa \operatorname{grad} T)$$

Pohyb výpočetní sítě

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{u}$$

Stavová rovnice

$$p = p(\varepsilon, \rho, T)$$

pro ideální plyn nebo QEOS

- numerické řešení Eulerových rovnic na 1D nebo 2D výpočetní síti

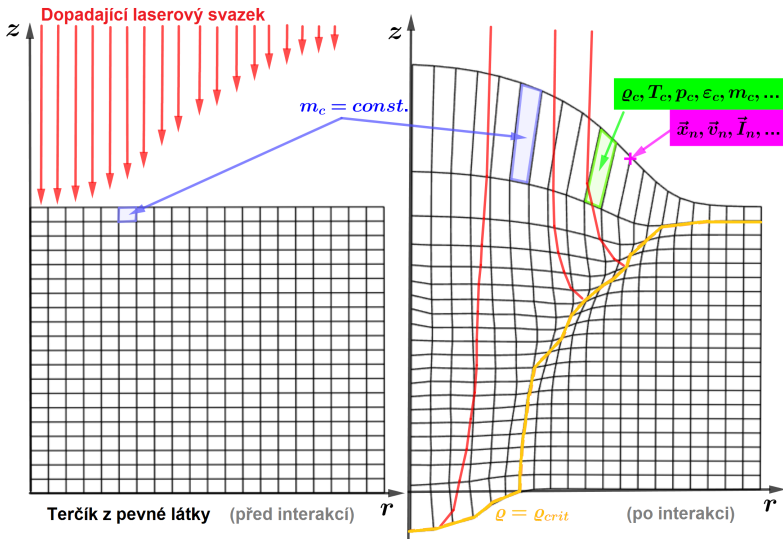
- v případě lagrangeovského modelování plazmatu je výpočetní síť vázána na hmotu materiálu a může se pohybovat, deformovat

- interakce s laserovým zářením je zahrnuta ve členu $\operatorname{div} \vec{T}$ v zákoně zachování energie

- $\operatorname{div} \vec{T}$ je vypočítána samostatně podle zvoleného absorpčního mechanismu

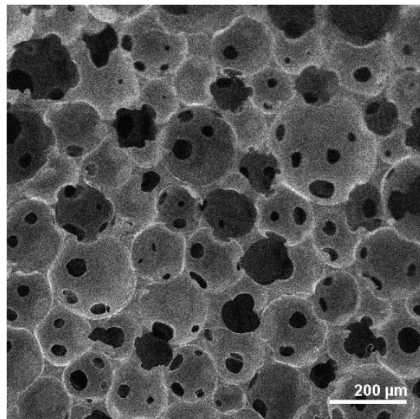
Modelování interakce laserového záření s pevným terčikem

Lagrangeovské souřadnice + Metoda trasování paprsků

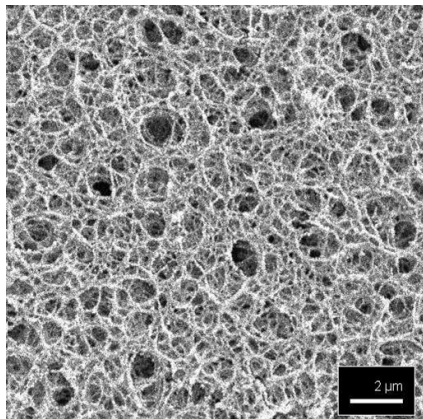


Vnitřní struktura porézního materiálu

- u pěnového materiálu jsou vysoké rozdíly v hustotě mezi stěnami póru (nadkritické) a okolním prázdňým místem (podkritické)



Polystyren 20 mg/cm³



Triacetát celulóza 9.1 mg/cm³

[A. Khaenkov et al., Laser and Particle Beams, 24 (2006)]

Homogenizace pěny

Interakce laserového záření a porézního materiálu

- laserové záření se absorbuje převážně na kritické ploše, neprojde přes kriticky husté plazma

Kritická hustota

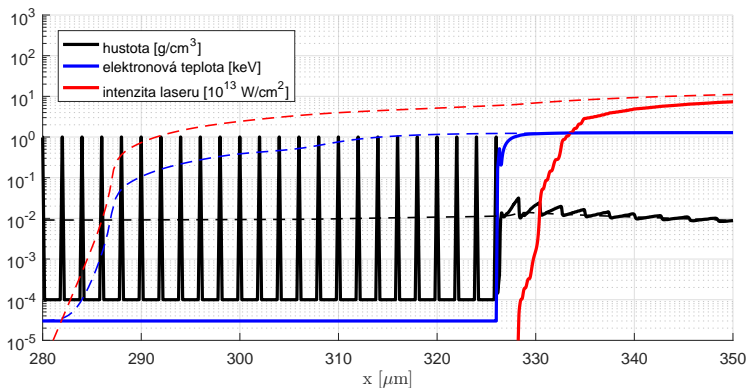
$$\rho_{cr} = \frac{Am_p m_e \pi c^2}{Ze^2 \lambda^2}$$

- při interakci dochází nejprve k vyplnění pórů expandujícím plazmatem
- energie laseru se během této doby deponuje pouze v jedné pěnové vrstvě
- až poté může laserové záření proniknout dále do materiálu (do další vrstvy)
⇒ zpomalení propalování pěnového terčíku oproti případu homogenního materiálu
- určuje unikátní vlastnosti pěnových materiálů - vysoká účinnost absorpce laserového záření (až 90 %) a vyhlazování nerovnoměrností v ozáření terčíku

Strukturovaný model

Metody pro modelování pěnového terčiku

- přímé započítání rozdílu v hustotě na hydrodynamické výpočetní síti
- střídání výpočetních buněk s vysokou (1 g/cm^3) a nízkou (10^{-4} g/cm^3) hustotou



[T. Kapin et al., Czech. J. Phys. 56 (2006)]

Multiškálový model, model šíření hydrotermální vlny

Metody pro modelování pěnového terčiku

- modelování interakce laserového záření s porézním terčíkem současně na dvou časových a prostorových škálách

1) na hydrodynamické (makroskopické) úrovni je porézní materiál modelován běžnými metodami jako homogenní materiál

2) navíc na mikroškálové (mikroskopické) úrovni je modelována interakce laserového svazku s mikrostrukturou pěny

→ numerické modelování 1D expanze tenké pěnové vrstvy (multiškálový model)

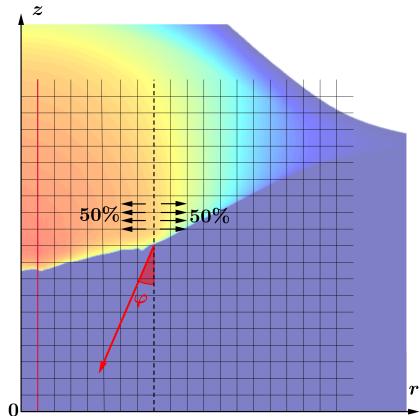
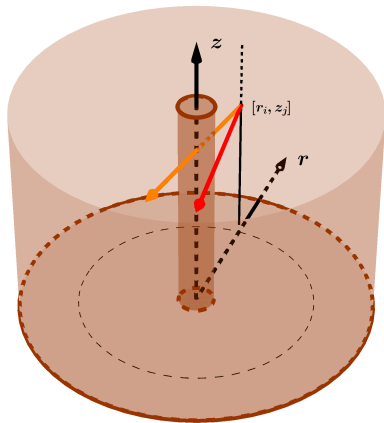
→ využití přibližného analytického řešení (model hydrotermální vlny)

Pevné pěnové elementy jsou v reálném materiálu orientovány náhodně - zaveden náhodný odraz paprsků na rozhraní mezi homogenizovanou a studenou pěnou

[J. Velechovský et al., Plasma Phys. Control. Fusion (2016)]

[M. Cipriani et al., Laser and Particle Beams, 36(1) (2018)]

Návrh modifikace náhodného úhlu odrazu pro 2D metodu trasování paprsků

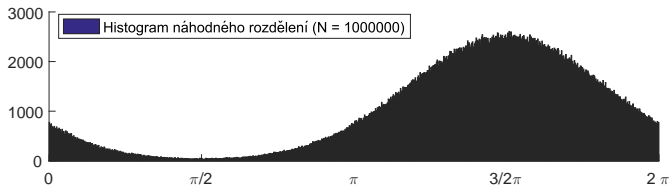


Návrh modifikace náhodného úhlu odrazu

Modifikace pravděpodobnostního rozdělení volby náhodného úhlu

Pro správné 3D rozložení náhodného odrazu by bylo potřeba 3D popisu šíření paprsků (projekce na 2D výpočetní síť)

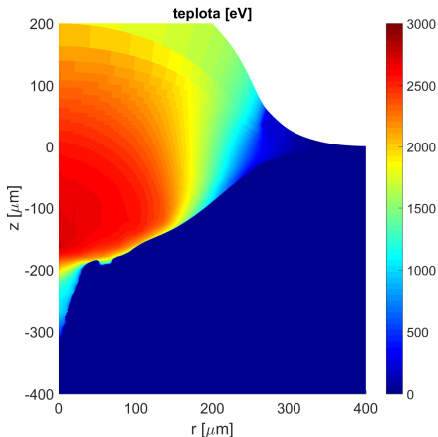
- jednodušší varianta zahrnuje změnu rozložení pravděpodobnosti odrazu paprsku směrem k ose
- rozdělení náhodného odrazu pak nebude rovnoměrné na $(0, 2\pi)$
- zvolili jsme normální rozdělení, transformované funkcí $\text{mod}(2\pi)$ na interval $(0, 2\pi)$
- hustota pravděpodobnosti byla posunuta v nezávislé proměnné tak, aby minimum rozdělení odpovídalo úhlu φ_{min}



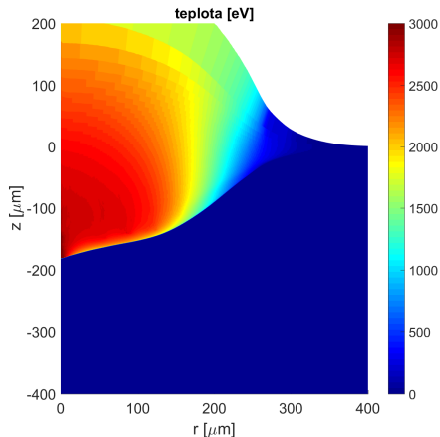
Návrh modifikace náhodného úhlu odrazu

Srovnání výsledků nemodifikovaného a modifikovaného multiškálového modelu

Srovnání v čase 320 ps (maximum intenzity laseru)



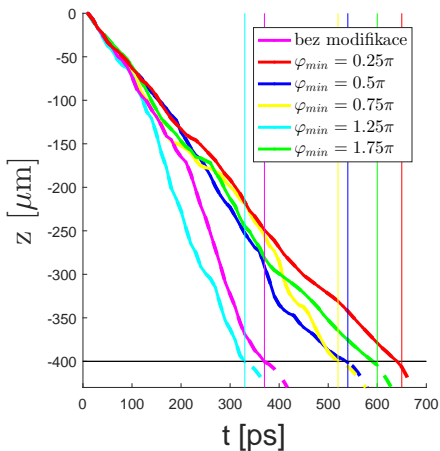
Bez modifikace náhodného odrazu



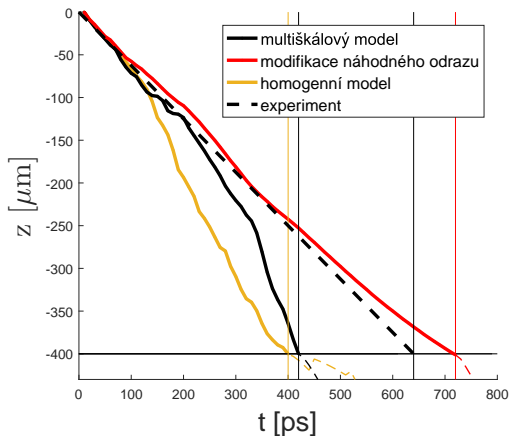
Modifikace $\varphi_{min} = \frac{\pi}{4}$

Návrh modifikace náhodného úhlu odrazu

Rychlost propalování pěnového terčiku



Hledání optimální hodnoty φ_{\min}

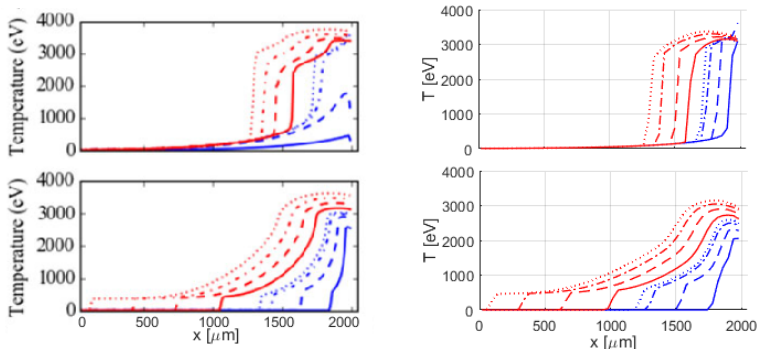


Srovnání výsledků použitých metod s experimentálně určenou rychlostí propalování

Diplomová práce

První část zadání - Implementace modelu hydrotermální vlny do 1D lagrangeovského kódu

Srovnání výsledků s [M. Cipriani et al., Laser and Particle Beams, 36(1) (2018)] (vlevo)
 - porézní materiál (nahore), homogenní materiál (dole)



Dále v zadání - vylepšení multiškálového modelu = propalování více pěnových vrstev současně, započítání jejich překrytí
 - srovnání výsledků všech modelů s experimentálními daty

Děkuji za pozornost