

Recirkulace rychlých elektronů při interakci krátkých intenzivních laserových pulsů s terčí a její vliv na $K\text{-}\alpha$ záření

Vojtěch Horný

Katedra fyzikální elektroniky
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
České vysoké učení technické

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Klimo, PhD.

4. února 2013

- 1 Úvod do problematiky
 - Zadání diplomové práce
 - Procesy vedoucí ke vzniku záření $K-\alpha$
- 2 Numerické simulace
 - Simulace metodou particle-in-cell
 - Simulace metodou Monte Carlo
- 3 Výsledky
 - Počet vyzářených fotonů $K-\alpha$
 - Velikost oblastí vyzařování
 - Návrh experimentálního uspořádání
- 4 Shrnutí

Zadání diplomové práce

- 1 Pomocí kódu PIC studujte problém recirkulace elektronů v závislosti na hustotě a teplotě rychlých elektronů a v závislosti na parametrech terče.
- 2 Vypracujte jednoduchý model recirkulace elektronů a naprogramujte jednoduchý program, který bude počítat, s jakou energií se recirkulující elektrony vrací zpět do terče
- 3 Provádějte simulace Monte Carlo a diskutujte vliv započtení recirkulace na výtěžek záření $K\text{-}\alpha$ pro různé případy.
- 4 Navrhněte terč a parametry experimentu, na kterém by mohl být vliv recirkulace demonstrován a dále studován.

Zadání diplomové práce

- 1 Pomocí kódu PIC studujte problém recirkulace elektronů v závislosti na hustotě a teplotě rychlých elektronů a v závislosti na parametrech terče.
- 2 Vypracujte jednoduchý model recirkulace elektronů a naprogramujte jednoduchý program, který bude počítat, s jakou energií se recirkulující elektrony vrací zpět do terče
- 3 Provádějte simulace Monte Carlo a diskutujte vliv započtení recirkulace na výtěžek záření $K\text{-}\alpha$ pro různé případy.
- 4 Navrhněte terč a parametry experimentu, na kterém by mohl být vliv recirkulace demonstrován a dále studován.

Zadání diplomové práce

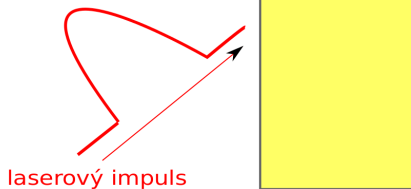
- 1 Pomocí kódu PIC studujte problém recirkulace elektronů v závislosti na hustotě a teplotě rychlých elektronů a v závislosti na parametrech terče.
- 2 Vypracujte jednoduchý model recirkulace elektronů a naprogramujte jednoduchý program, který bude počítat, s jakou energií se recirkulující elektrony vrací zpět do terče
- 3 Provádějte simulace Monte Carlo a diskutujte vliv započtení recirkulace na výtěžek záření $K\text{-}\alpha$ pro různé případy.
- 4 Navrhněte terč a parametry experimentu, na kterém by mohl být vliv recirkulace demonstrován a dále studován.

Zadání diplomové práce

- 1 Pomocí kódu PIC studujte problém recirkulace elektronů v závislosti na hustotě a teplotě rychlých elektronů a v závislosti na parametrech terče.
- 2 Vypracujte jednoduchý model recirkulace elektronů a naprogramujte jednoduchý program, který bude počítat, s jakou energií se recirkulující elektrony vrací zpět do terče
- 3 Provádějte simulace Monte Carlo a diskutujte vliv započtení recirkulace na výtěžek záření $K\text{-}\alpha$ pro různé případy.
- 4 Navrhněte terč a parametry experimentu, na kterém by mohl být vliv recirkulace demonstrován a dále studován.

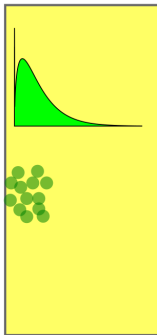
Schématický nákres situace

Na terč dopadá
velmi krátký
laserový impuls.



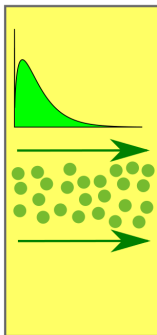
Schématický nákres situace

Terč je ionizován a vzniká spektrum rychlých elektronů.



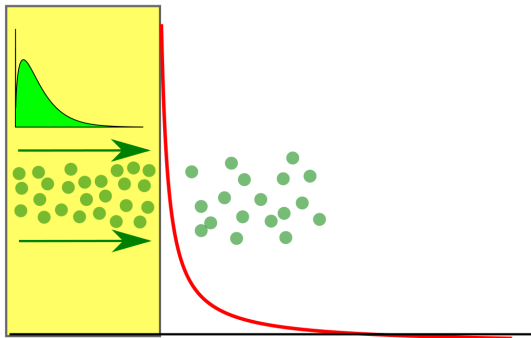
Schématický nákres situace

Rychlé elektrony pronikají do chladné část terče a ionizují jeho zadní stěnu.



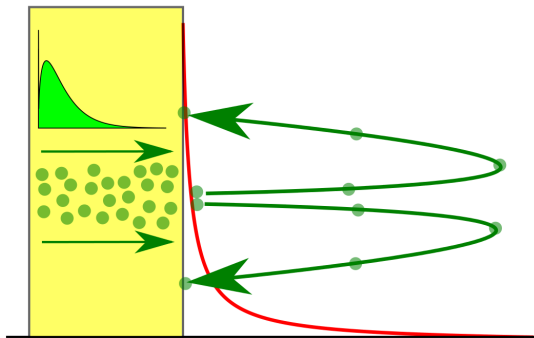
Schématický nákres situace

Za terčem vzniká
intenzivní elektrické
pole.



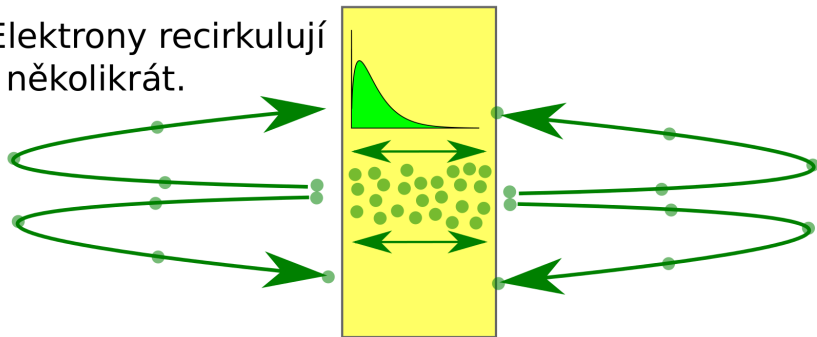
Schématický nákres situace

Elektrické pole
navrací elektrony
zpět do terče.



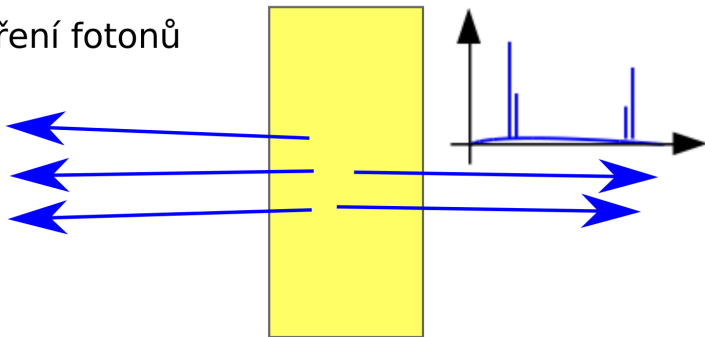
Schématický nákres situace

Elektrony recirkulují
i několikrát.



Schématický nákres situace

Vyzáření fotonů



Procesy vedoucí ke vzniku záření K- α

po interakci laserového záření s pevnou látkou

- 1 Vznik rychlých elektronů
 - rezonanční absorpce
 - vakuový ohřev
 - $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ ohřev
- 2 transport rychlých elektronů terčem
 - nepružné srážky s atomy
 - pružné srážky s atomy
 - zpětný proud
- 3 excitace vnitřních slupek atomů v materiálu terče
- 4 deexcitace atomů
 - vyzáření Augerova elektronu
 - vyzáření charakteristického fotonu

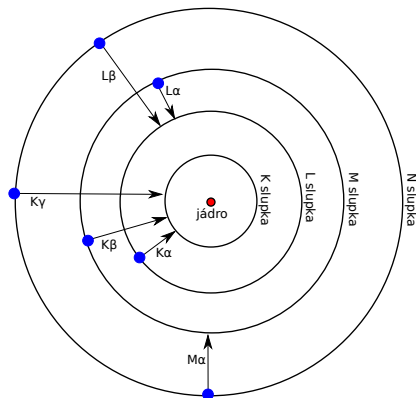
Charakteristické záření

Charakteristické záření vzniká při přechodu elektronu v obalu atomu na nižší hladinu.

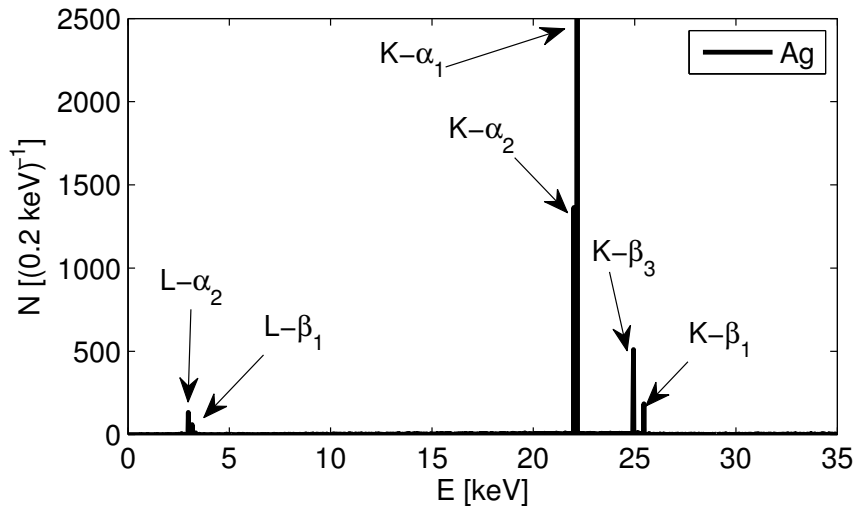
Vlastnosti:

- diskrétní čárové spektrum
- tabelizované pro každý prvek
- polohy čar z rozdílu energií jednotlivých slupek
- mohou se vyskytovat multiplety
- energie čar K- α

hliník	1,49 keV
měď	8,03 keV
stříbro	21,99 keV



Charakteristické záření



Elektron za dobu strávenou v potenciálu za terčem ztratí energii

$$\left\langle \frac{d\mathcal{E}}{dt} \right\rangle = -e \left\langle \frac{\partial\Phi}{\partial t} \right\rangle = -e \frac{\oint \frac{\partial\Phi}{\partial t} \frac{dx}{\sqrt{\mathcal{E} + e\Phi}}}{\oint \frac{dx}{\sqrt{\mathcal{E} + e\Phi}}}. \quad (1)$$

Uvažujeme automodelový potenciál

$$e\Phi_{ss} = -k_B T_e \left(1 + \frac{x}{c_s t} \right). \quad (2)$$

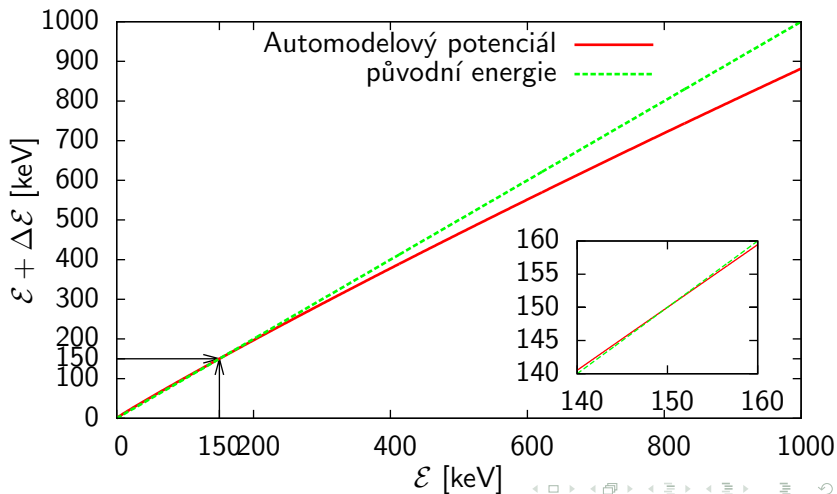
Po dosazení lze vyjádřit

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sqrt{\frac{Zm_e}{m_i}} \sqrt{\frac{\mathcal{E}}{k_B T_e}} \left(\frac{3k_B T_e}{2} - \mathcal{E} \right). \quad (3)$$

Recirkulace elektronů

Model izotermické expanze

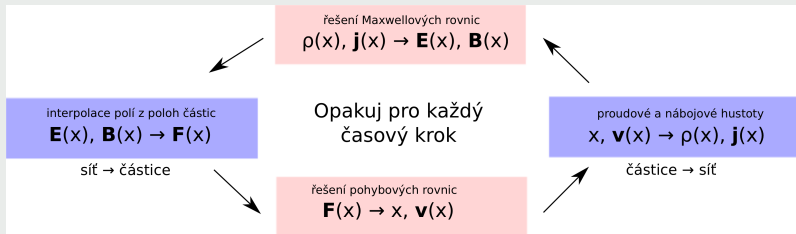
Ilustrativní příklad: $k_B T_e = 100$ keV



Simulace metodou PIC

- 1 Simulace metodou particle-in-cell byly prováděny za účelem ověření vztahu pro úbytek energie recirkulujícího elektronu za terčem.
- 2 Byl využit výpočetní kód LPIC++ (C++, 1D3V)

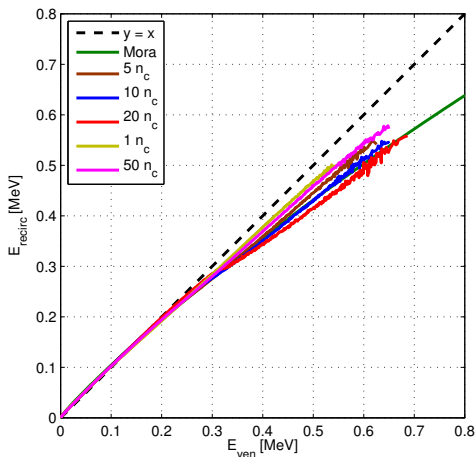
Princip numerické metody



Simulace metodou PIC

Závislost energie recirkulujících elektronů na výstupní energii

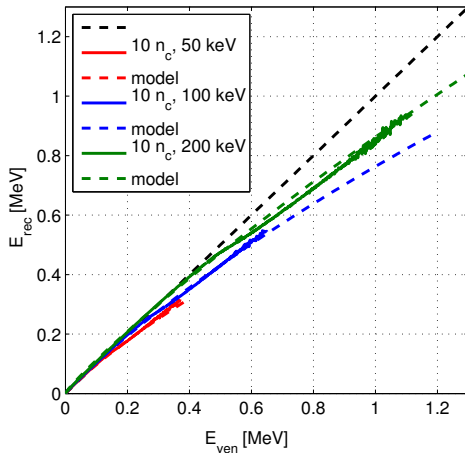
Stejná teplota rychlých elektronů, různá hustota



Simulace metodou PIC

Závislost energie recirkulujících elektronů na výstupní energii

Stejná hustota rychlých elektronů, různá teplota



Simulace metodou PIC

Zhodnocení výsledků

- 1 Pomalejší elektrony ($\mathcal{E} < \frac{3}{2}k_B T_e$) se navracejí mírně urychleny, rychlejší jsou zpomalovány, někdy až o 20%.
- 2 Změna energie recirkulujícího elektronu závisí na hustotě rychlých elektronů jenom mírně.
- 3 Změna energie recirkulujícího elektronu závisí na teplotě spektra rychlých elektronů. Po chladnější spektrum klesá teplota rychleji.
- 4 Uspokojivě byl ověřen model

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sqrt{\frac{Zm_e}{m_i}} \sqrt{\frac{\mathcal{E}}{k_B T_e}} \left(\frac{3k_B T_e}{2} - \mathcal{E} \right)$$

Simulace metodou Monte Carlo

Cíle

- 1 demonstrovat vliv recirkulace elektronů na výtěžek záření K- α na zadní straně terče a na velikost oblasti vyzařování
- 2 kvantifikovat vliv recirkulace
 - pro různé materiály
 - pro různé tloušťky terče
 - pro různé teploty spektra rychlých elektronů

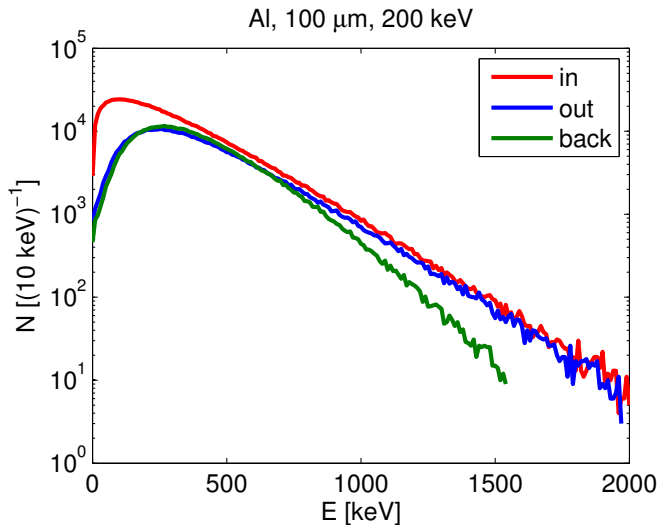
Výpočetní kód PENELOPE

PENetration and Energy Loss of Positrons and Electrons

3D kód vyvinutý na barcelonské univerzitě napsaný v jazyce Fortran77 umožňující simulace transportu elektronů, pozitronů a fotonů pro energie 50 eV až 1 GeV.

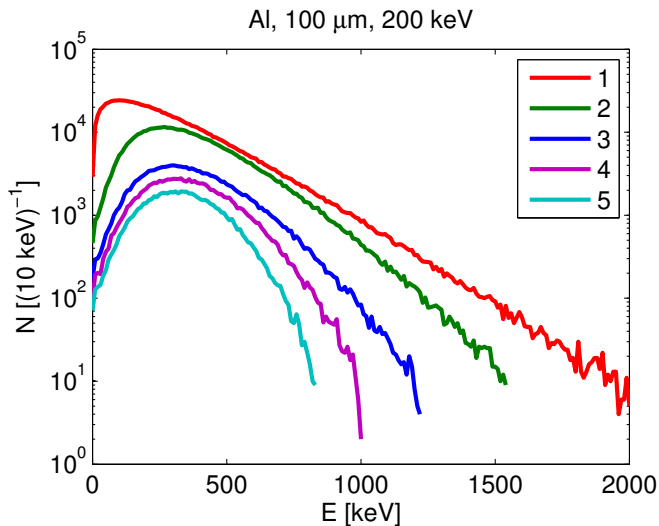
Simulace metodou Monte Carlo

Zohlednění vlivu recirkulace



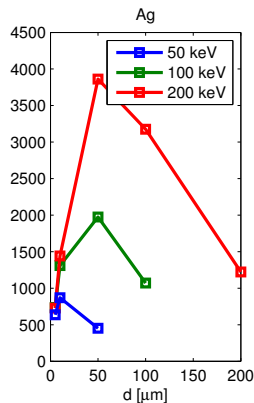
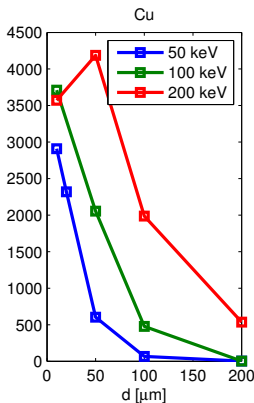
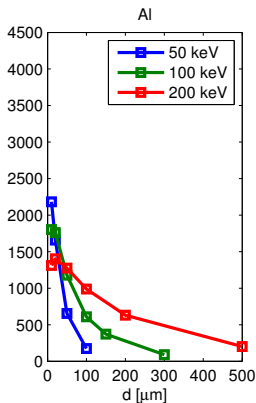
Simulace metodou Monte Carlo

Vývoj elektronového spektra pro jednotlivé iterace



Počet vyzářených fotonů $K\text{-}\alpha$ ¹

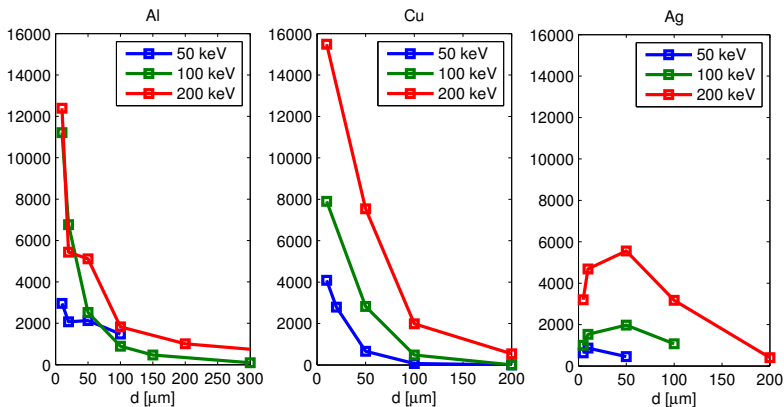
1 Bez započítání vlivu recirkulace



¹na 1 000 000 vstupních rychlých elektronů

Počet vyzářených fotonů $K\text{-}\alpha$ ²

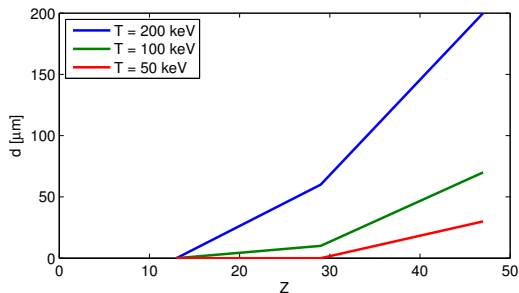
2 Se započítáním vlivu recirkulace



²na 1 000 000 vstupních rychlých elektronů

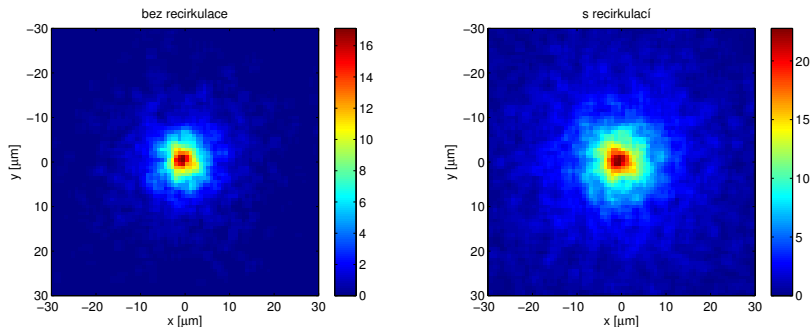
Nejvýraznější roli hraje recirkulace pro

- 1 tenčí terče
- 2 vyšší teploty elektronového spektra
- 3 materiály s nižším atomovým číslem



Vliv recirkulace na velikost oblasti vyzařování

Měděný terč, $10\ \mu\text{m}$, $k_B T_e = 200\ \text{keV}$, 10^6 vstupních elektronů³



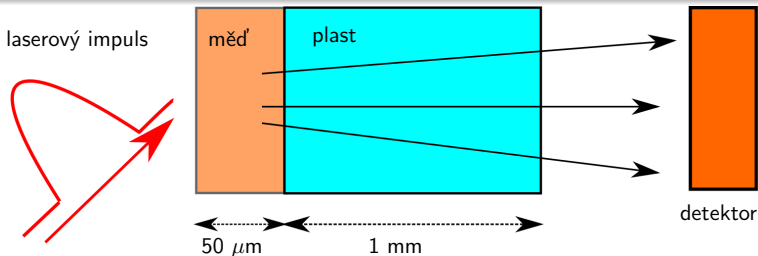
Patrný nárůst velikosti oblasti vyzařování, pro tenké terče až o desítky procent.

³Elektronový svazek vstupuje do terče v bodě (0,0). Barvou znázorněn počet fotonů na pixel o velikosti $0.8\ \mu\text{m} \times 0.8\ \mu\text{m}$. Vyhlazeno konvoluční maskou.

Návrh experimentálního uspořádání

Měděná vrstva nanesená na plastu

- 1 Provést měření spektra záření dle schématu dole. Plastová vrstva zabraňuje recirkulaci, ale propouští záření.
- 2 Opakovat měření bez plastové vrstvy.
- 3 Porovnáním spekter může být vliv elektronové recirkulace demonstrován.



- 1 Simulace recirkulace elektronů metodou particle-in-cell ověřily platnost vztahu pro změnu energie recirkulujícího elektronu za terčem.
- 2 Simulace transportu elektronů a záření terčem metodou Monte Carlo prokázaly vliv recirkulace elektronů na výtěžek záření $K\text{-}\alpha$. Největší nárůst je pozorován pro
 - tenčí terče
 - vyšší teploty spektra rychlých elektronů
 - terče z materiálů s nižším atomovým číslem.
- 3 Byl navržen terč a parametry experimentu, kde by mohl být vliv recirkulace demonstrován.

Zadání diplomové práce bylo splněno.

Děkuji za pozornost

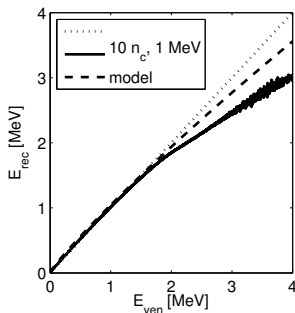
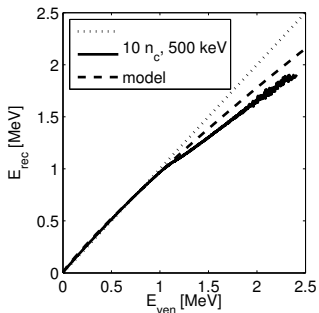
- **Vojtěch Horný**
- KFE FJFI ČVUT v Praze
- vojtech.horny@atlas.cz
- kfe.fjfi.cvut.cz/~horny



Odpovědi oponentovi: zvolené teploty spekter

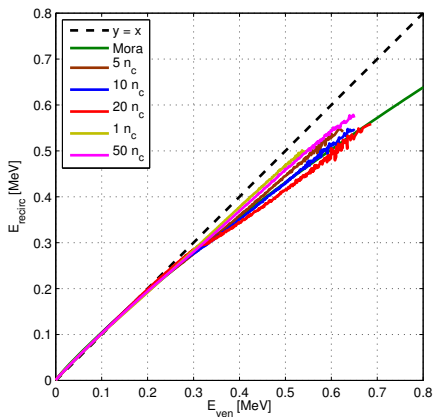
Proč byl vybrán interval teploty rychlých elektronů 50 keV až 200 keV?

- Pro záření K- α relevantní teploty v desítkách až stovkách keV.
- Simulace až po teplotu spektra 1 MeV.
- Dobrá shoda s modelem pro teploty do 200 keV.
- Pro energetičtější elektrony relativistické efekty.



Odpovědi oponentovi: zvolené hustoty rychlých elektronů

Rozmezí hustot je příliš malé.



Na jakém konkrétním laserovém zařízení je možné realizovat navržený experiment?

- Limitována délka impulsu ($\tau < 200$ fs)
- Výkon nanejvýše 10^{18} W/cm²
- Na laseru v zařízení PALS patrně nedostatečný kontrast.
- Vhodným zařízením by se mohl stát laserový systém v centru CEA Saclay ve Francii.