

Spektroskopické studium laserového plazmatu.

Bc. Michal Šmíd
FJFI ČVUT
smidmic4@fjfi.cvut.cz

školitel:
Ing. Oldřich Renner, DrSc.
Fyzikální ústav AV ČR

Zimní škola FTTF
Mariánská, 20.1.2010

Obsah

- 1 Úvod
 - Stav projektu
 - Motivace
 - Dvoufoliové interakční experimenty
- 2 Teoretická spektra
 - Rovnice pro distribuci ionizačních/excitačních stavů
 - Rovnice transportu záření
 - Optická tloušťka
- 3 Experimenty
 - Základní informace
 - Zpracování dat
 - Možné závěry
- 4 Závěr
 - Zhodnocení semestru
 - Plány do budoucna

Stav projektu

Loňský akademický rok:

- Vývoj nového kódu pro zpracování dat z VJS. (těžiště mé BP)
- Provedení série dvoufoliových interakčních experimentů.
- Jejich předběžné vyhodnocení, detailnější vyhodnocení nás teprve čeká.

Letošní zimní semestr:

- Porozumění a používání kódu pro generování teoretických spekter.
- Vyvinutí metodiky a nástrojů pro porovnávání experimentálních a teoretických spekter.
- Použití této metody na zpracování experimentálních dat.

Motivace

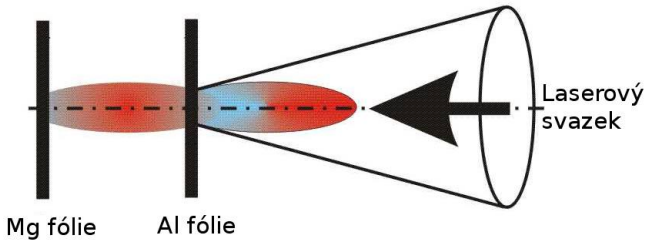
- Základní výzkum v oblasti chování a vlastností horkého hustého plazmatu.
- Sběr přesných spektroskopických měření → experimentální základ pro vývoj příslušných modelů plazmatu.

Dvoufoliové interakční experimenty (o kterých dnes nebude příliš řeč):

- Interakce vstříčných svazků plazmatu.
- Interakce plazmatu se stěnou
- Modelované situace se vyskytují v MCF, ICF i v astrofyzice.

Dvoufoliové interakční experimenty (krok stranou)

↑ směr pozorování pomocí
vertikálně disperzního
Johannova spektrometru



Teoretická spektra

- Experimentální spektra jsou velmi komplikovaná pro přímé vyhodnocení.
- Je výhodné je porovnávat s teoretickými (simulovanými) spektry.
- Výsledné parametry plazmatu se určí jako ty, pro které se teoretické a experimentální spektra nejlépe shodují.

Collisional-radiative model (non-LTE)

- Vyplňuje prostor mezi koronálním modelem (řídke plazma) a LTE modelem (husté / rovnovážné plazma).
- Řeší vzájemně provázané sady rovnic pro distribuci ionizačních a excitačních stavů, příslušných (de)populačních a (de)excitačních procesů včetně radiačního transportu.
- Potřebuje velké množství atomových dat.

Rovnice pro distribuci ionizačních/excitačních stavů

Rate equations [1]:

$$\frac{dn_i}{dt} = -n_i \sum_{j:j \neq i} W_{ij} + \sum_{j:j \neq i} n_j W_{ji} \quad (1)$$

- n_i - hustota iontů v i -tém stavu,
- W_{ij} je koeficient přechodu mezi stavy i a j .
 - ▶ Zahrunje (de)populační a (de)excitační procesy.
 - ▶ Závisí na teplotě, hustotě a na intenzitě záření v daném místě pro danou energii přechodu.
 - ▶ Spontání/stimulovaná emise, srážková excitace, fotoionizace, záchyt elektronu, ...

Rovnice transportu záření

Velmi zjednodušená, pro záření konstantní v čase a pro 1D rovinné plazma:

$$\frac{dl}{dz} = \varepsilon - \kappa l \quad (2)$$

- $I(z, \nu)$ je intenzita záření v daném místě pro danou frekvenci.
- $\varepsilon(z, \nu)$ je emisivita, tj. počet vyzářených fotonů na jednotku objemu a času.
- $\kappa(z, \nu)$ je absorptivita, tj. pravděpodobnost absorpce fotonu na jednotku objemu a času.

ε a κ závisí na teplotě, tlaku a obsazenosti příslušných stavů schopných emitovat či absorbovat fotony.

Řešení rovnic

- Stacionární, $\frac{dn_i}{dt} = 0$
- Zahrnutí mnoha zjednodušení.
- Iterativní řešení.

- Pro náš případ - homogenní rovinné plazma.
- Ukázka možného vlivu na spektrum - optická tloušťka.

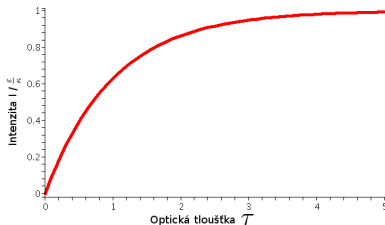
Optická tloušťka

- Optická tloušťka $\tau(z, \nu) = \int_0^z \kappa(z', \nu) dz'$. [2]
- Rovnice transportu lze přepsat na

$$\frac{dI}{d\tau} = \frac{\varepsilon}{\kappa} - I. \quad (3)$$

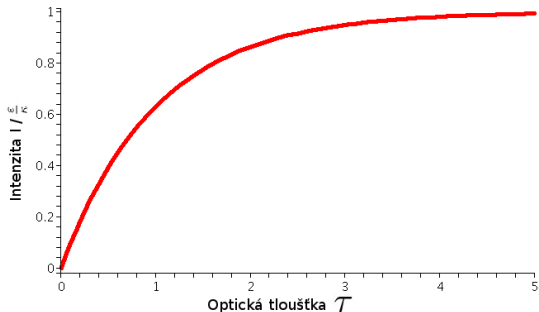
- Homogenní, omezené plazma o tloušťce $L \Rightarrow$ řešení

$$I = \frac{\varepsilon}{\kappa}(1 - e^{-\tau}) = \frac{\varepsilon}{\kappa}(1 - e^{-\kappa L}). \quad (4)$$



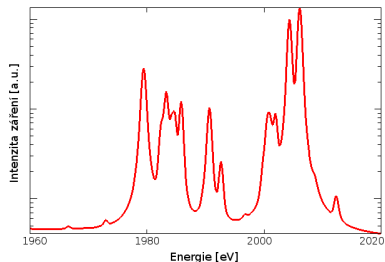
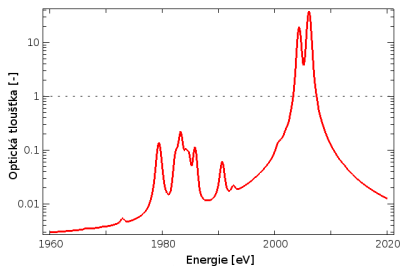
Vliv optické tloušťky

- $\tau < 1 \Rightarrow$ opticky tenké plazma, $I \propto L$.
- $\tau \gg 1 \Rightarrow$ opticky tlusté plazma, $I = \frac{\varepsilon}{\kappa}$, nezávisí na L .
- pro LTE – Kirchhoffův zákon: $\frac{\varepsilon}{\kappa} = I_{Planck}$ – záření černého tělesa.



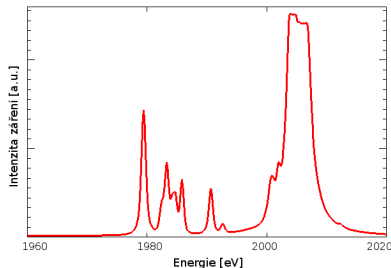
Ukázka profilů ε a κ .

- Teoretické profily z programu PRISMPECT.
- Homogenní plazma SiO_2 ,
 $T = 350\text{eV}$, $n_i = 8 * 10^{20} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^3}$
- Oblast Si čáry $\text{Ly}\alpha$ ($\approx 0.6\text{nm}$) včetně jejich satelitů.
- Optická tloušťka zobrazena pro $L = 100\mu\text{m}$, $\tau \propto \kappa$.
- Intenzita záření zobrazena pro bezrozměrné plazm – $I \propto \varepsilon$.

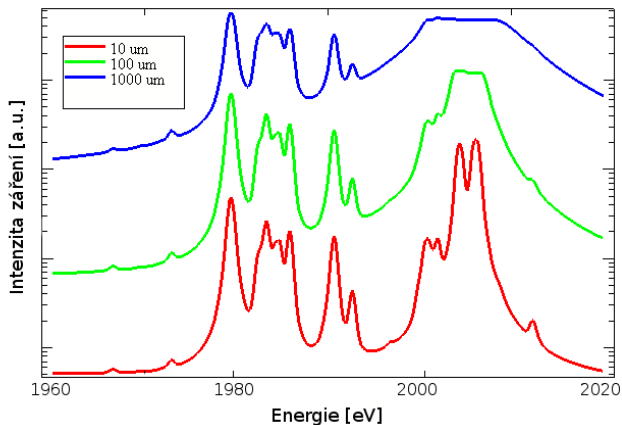


Výsledná emise

- Teoretický profil z programu PRISMPECT.
- Emise za stejných podmínek při $L = 100\mu m$.
- Opticky tenká satelitní struktura prakticky shodná s emisí bezrozměrného plazmatu.
- Opticky tlustá rezonanční čára "seříznuta" reabsorpcí.



Emise pro různé tloušťky plazmatu

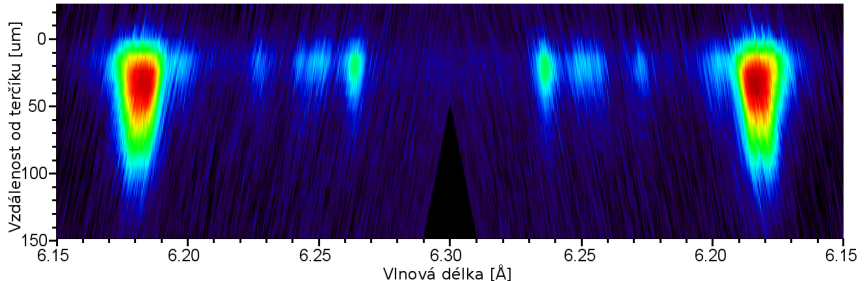


Experimenty

- Experimenty prof.Limpoucha, prováděny v lednu 2009 v laboratoři PALS.
- Terčík ozářen laserovým pulzem o délce $\approx 250\text{ps}$,
 $\lambda = 1.315\mu\text{m}$ a $E \approx 70\text{J}$
- Dvě varianty terčίκů:
 - 1 Masivní SiO_2 terčík, fokální skvrna $\varnothing 80\mu\text{m}$.
 - 2 SiO_2 tečka o průměru $100\mu\text{m}$ a tloušťce $1\mu\text{m}$ napařená na plastovém podkladu. Fokální skvrna $\varnothing 250\mu\text{m}$.
- RTG emise měřena VJS spektrometerem s prostorovým rozlišením $8\mu\text{m}$ a spektrálním rozlišením $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 6000$.

Naměřená data z VJS spektrometru

- Spektrometr poskytuje dvě symetrická, prostorově rozlišená spektra.
- Data zaznamenaná na RTG film, naskenována a zpracována programem VJS ANALYSER.
- $1\text{\AA} = 0.1\text{nm}$

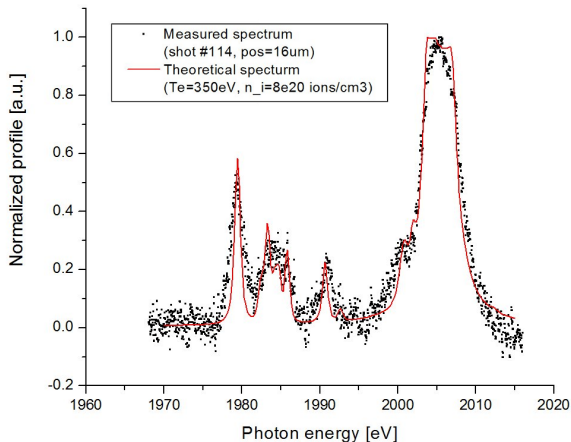


Zpracování naměřených spekter I.

- Programem PRISMPECT byla vygenerována sada teoretických spekter pro různé hodnoty T a n_i pro SiO_2 při tloušťce plazmatu $L = 100\mu\text{m}$
- Byl vytvořen program, který načte tyto data a naměřené profily a pro každý naměřený profil automaticky vyhledá “nejlépe odpovídající” teoretické spektrum.
- Zpracování spekter ukázalo, že bude žádoucí vylepšit proces automatického fitování; program proto v současné době nabízí možnost zpřesnění “nejlepšího fitu” ručně.
- Výsledkem je prostorový profil teploty a hustoty plazmatu.

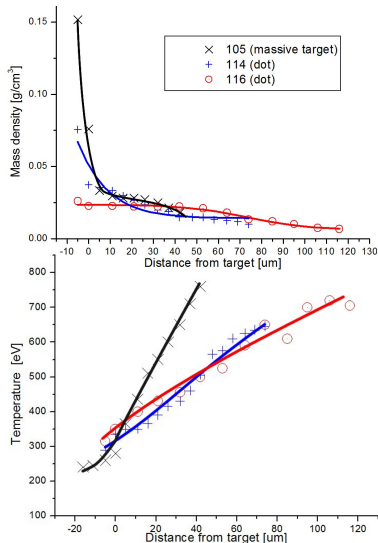
Zpracování naměřených spekter II.

- Porovnání naměřeného spektra s nejlépe odpovídajícím teoretickým spektrem.



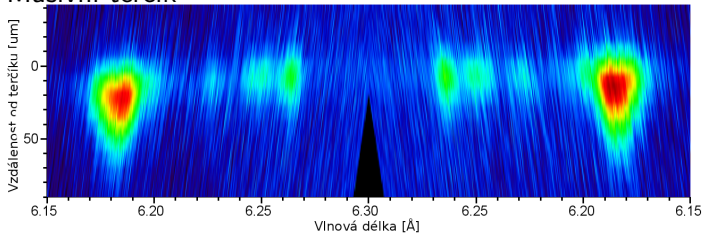
Prostorový profil teploty a tlaku.

- Zpracovány data ze tří podobných experimentů.
- Data z “počátku” a “konce” plazmatu – menší intenzita záření → menší věrohodnost dat.

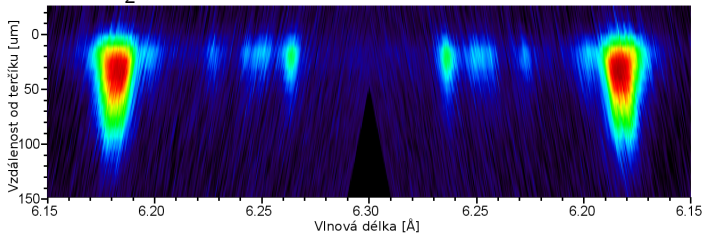


Opět hrubá data

Masivní terčik

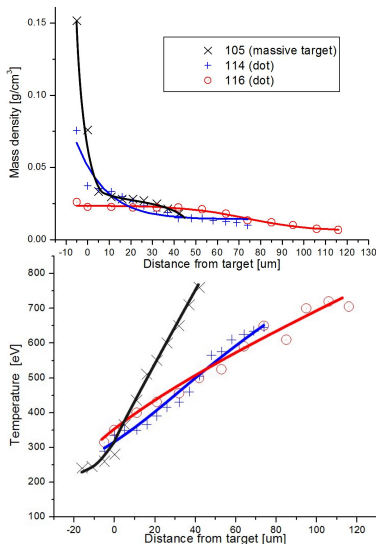


Tečka SiO₂



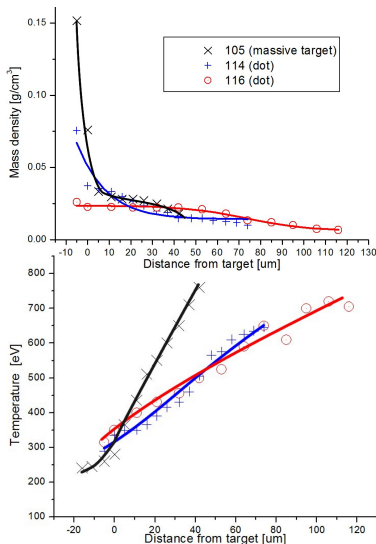
Možné závěry I.

- Pro terč tečka SiO_2 - plazma pozorujeme do větší vzdálenosti od terčíku \rightarrow možný vliv udržení okolním plastovým plazmatem.
- Poblíž terčíku vyšší hustota pro masivní terč \rightarrow možný vliv vyšší počáteční hustoty terče oproti napařenému SiO_2 .
- Ve větší vzdálenosti není pozorován podstatný rozdíl v hustotách.



Možné závěry II.

- Pro masivní terč prudší nárůst teploty se vzdáleností → může být způsobeno:
 - ▶ vyšší intenzitou laseru. (na masivní terčik byla menší fokální skvrna $\varnothing 80\mu\text{m}$ oproti $\varnothing 250\mu\text{m}$ pro tečku)
 - ▶ Tečka tenká $\approx 1\mu\text{m}$ absorbuje jen počátek pulzu, zatímco masivní terč absorbuje a produkuje plazma po celou dobu pulzu.



Zhodnocení uplynulého semestru

- Nastudování základních principů tvorby teoretických spekter nerovnovážného plazmatu.
- Porovnání příslušných simulačních kódů.
- Vývoj metodiky a potřebných nástrojů pro porovnávání a fitování experimentálních a teoretických spekter.
- Zpracování části dat z SiO_2 experimentů.

Plány do budoucna

- Vyhodnocení zbylých SiO_2 experimentů - potvrzení či vyvrácení naznačených závěrů.
- Detailnější vyhodnocení ložských interakčních experimentů.
- Návrh a provedení optimalizovaných interakčních experimentů na PALS.

Použitá literatura



H.K.Chung et al.

The How To For FLYCHK

URL: <http://www.unn.ac.uk/central/isd/cite/elec.htm> [cit. 2010-01-10]



F.B.Rosmej

X-ray emission spectroscopy and diagnostics of non-equilibrium fusion and laser produced plasma.
2009.

Konec

- Děkuji za pozornost.