Dvoufóliové experimenty a CR simulace laserového plazmatu.

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

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

Zimní škola FTTF
Mariánská, 12.1.2011

Obsah

1. Úvod
   - Motivace
2. Praktická část
   - Dvoufóliové interakční experimenty
   - Ukázka výsledků
   - Fotografie
3. Teoretická část
   - Simulace emise plazmatu
   - Budování atomového modelu
4. Závěr
   - Zhodnocení semestru
   - Plány do budoucna

Motivace

- Základní výzkum v oblasti chování a vlastností horkého hustého plazmatu. (stovky eV; $\approx 10^{-2}$ g cm^{-3}, 10^{20} cm^{-3})
- Sběr precizních spekter $\rightarrow$ experimentální základ pro vývoj příslušných modelů plazmatu.

Dvoufóliové interakční experimenty

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

Collisional – radiative (CR) simulace

- Podstatný nástroj pro vyhodnocení naměřených spekter

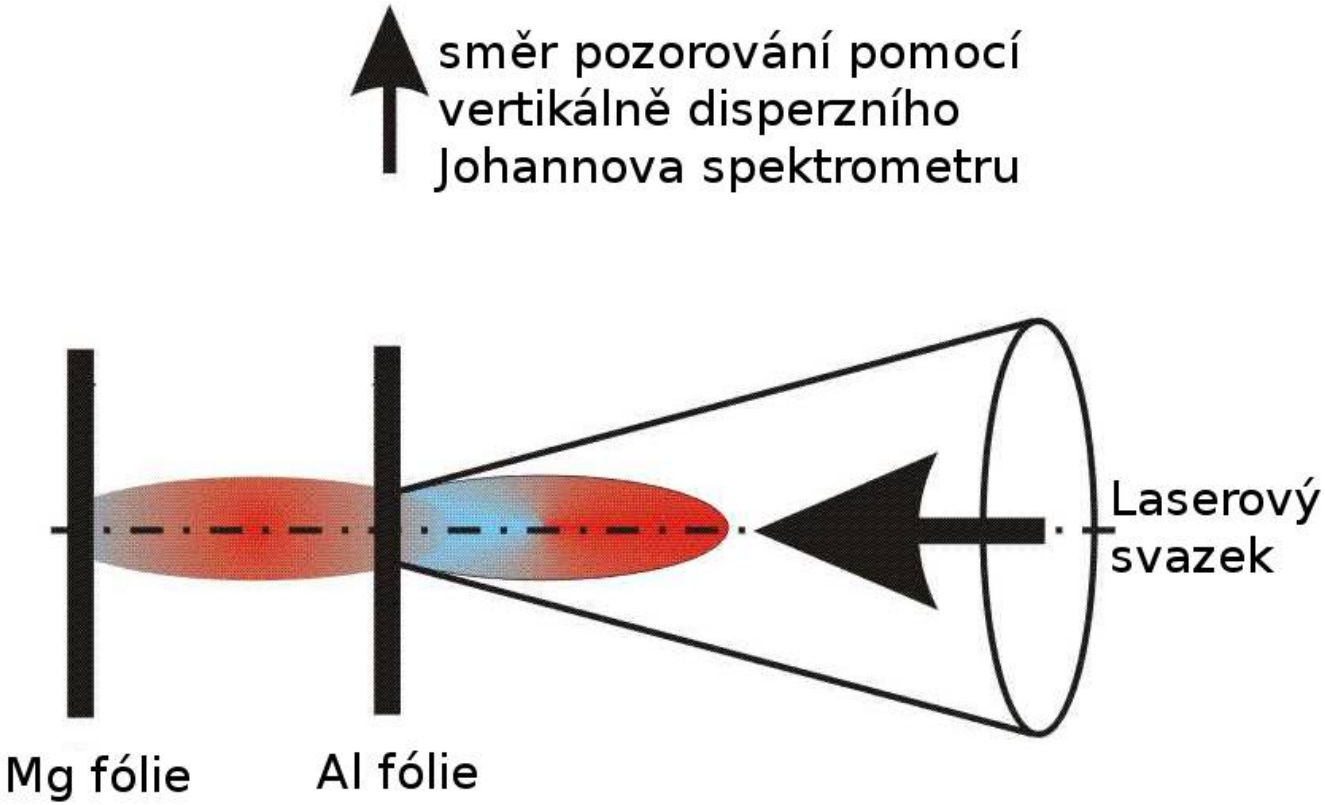
Dvoufóliové interakční experimenty

- Prováděny mj. v lednu 2009 a srpnu 2010 v laboratoři PALS.
- Laserový pulz o délce ≈ 250 ps , $\lambda = 1315$ nm nebo 438 nm a $E \approx 30 \div 120$ J
- Terčík: dvě fólie z různých kovů (Al, Mg, Ta, Ag) o tloušťkách $0.5 \div 2$ μm.

Hlavní diagnostika: VJS spektrometr [1]

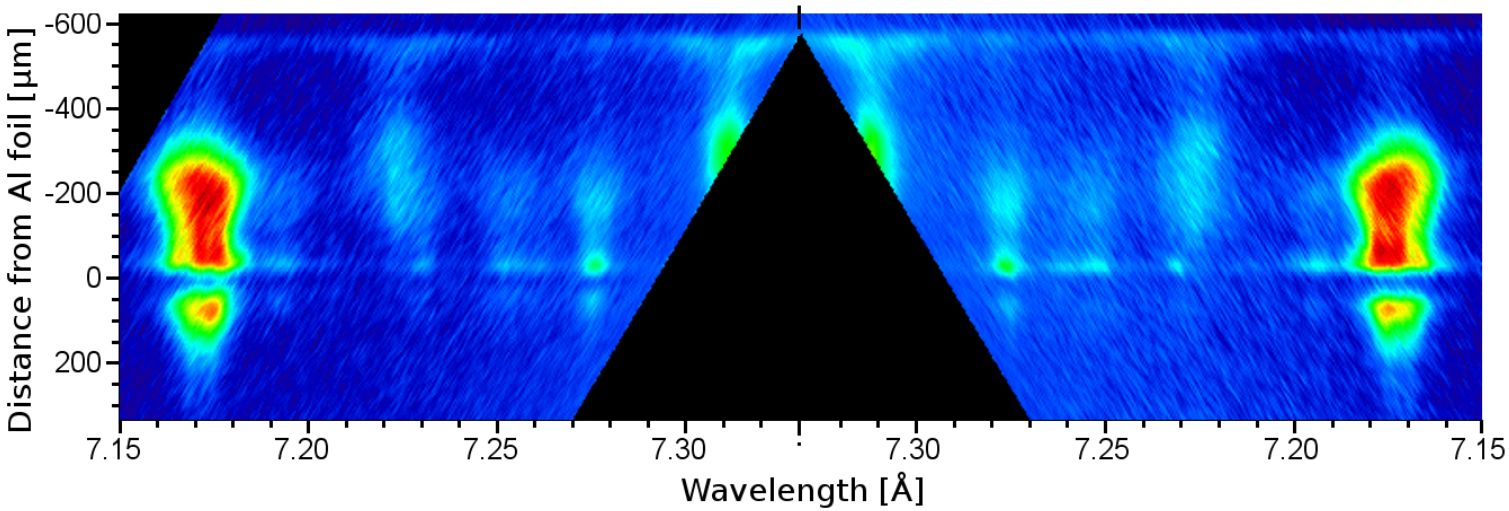
- RTG spektra v oblasti ≈ 7 Å (0.7 nm)
- Spektrální rozlišení $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 6000$.
- Obvykle nastaven na detekci rezonanční čáry a jejich satelitů.
- Poskytuje prostorové rozlišení podél osy experimentu.

Dvoufóliové interakční experimenty - schéma



Prostorově rozlišená spektra

- Al fólie ~ 0 μm, Mg fólie ~ 550 μm.
- Al $Ly_\alpha \sim 7.17$ Å, Al J–satellite ~ 7.28 Å
- Mg $He_\epsilon \sim 7.23$ Å, Mg $He_\delta \sim 7.30$ Å



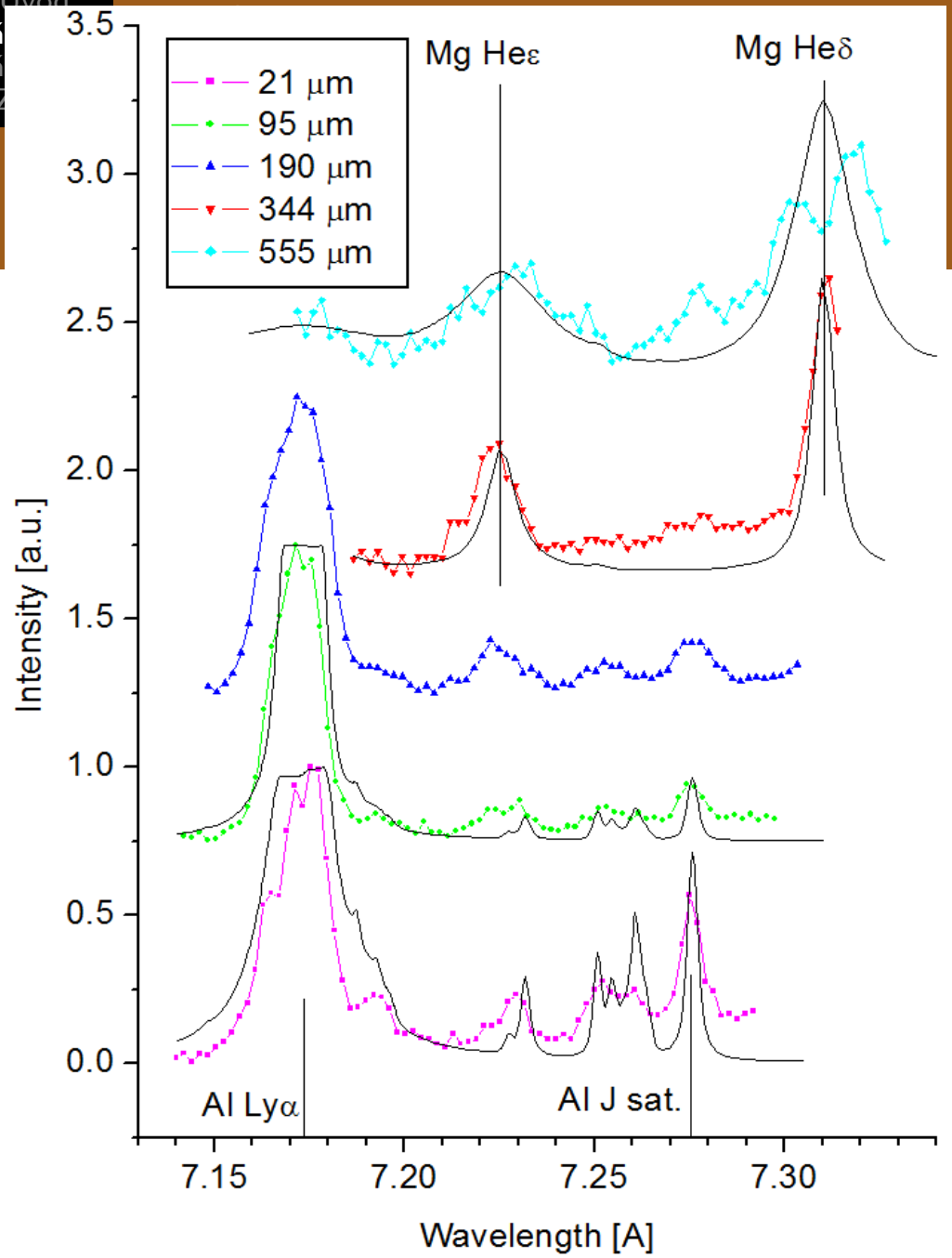
Vybraná spektra

Spektra fitována simulacemi homogeního plazmatu kódem PrismSpect.

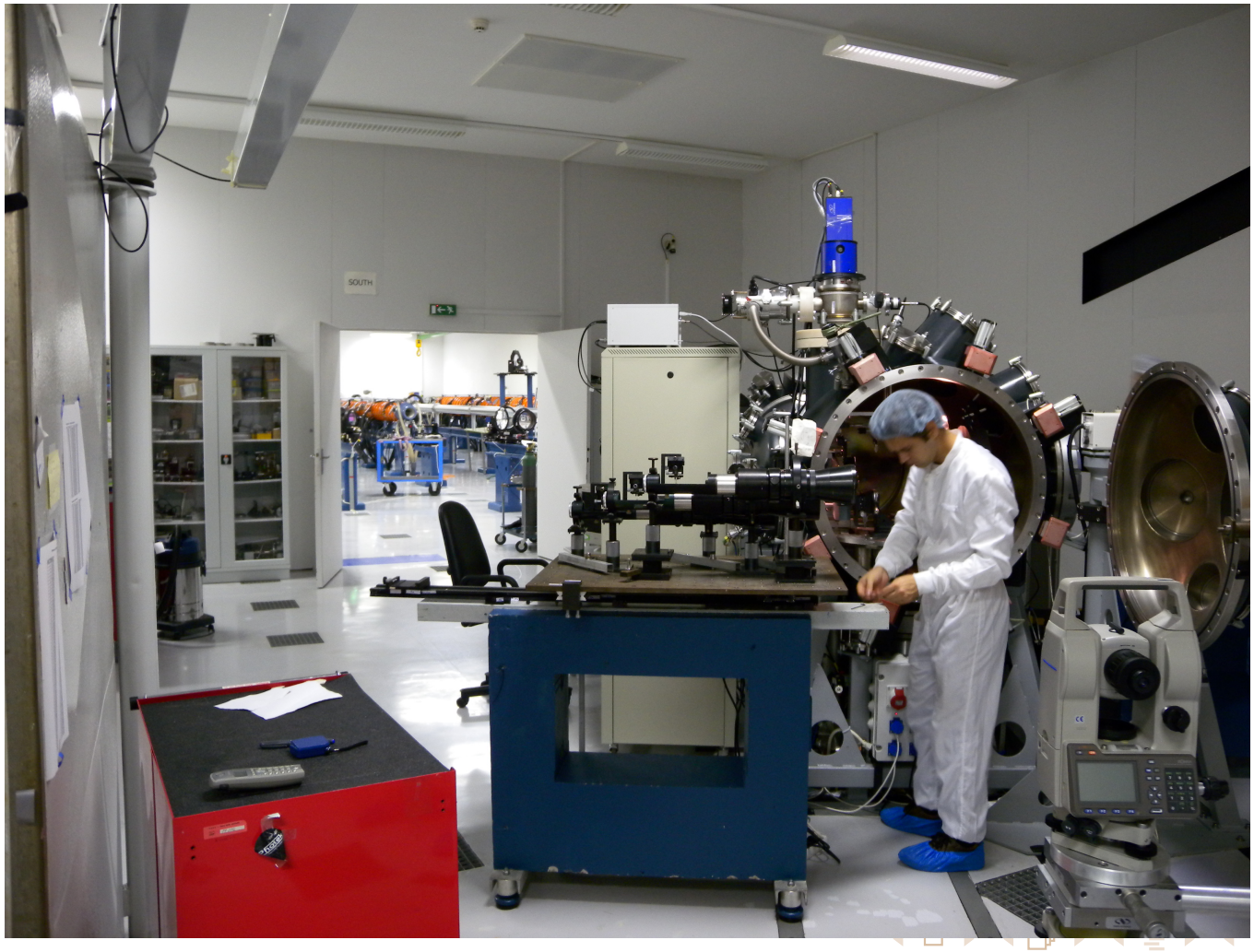
Parametry fitovaných spekter:

d [μm]	Mat.	T [eV]	ρ [g/cm^3]
555	Mg	200	0.02
344	Mg	200	0.005
95	Al	480	0.01
21	Al	300	0.02

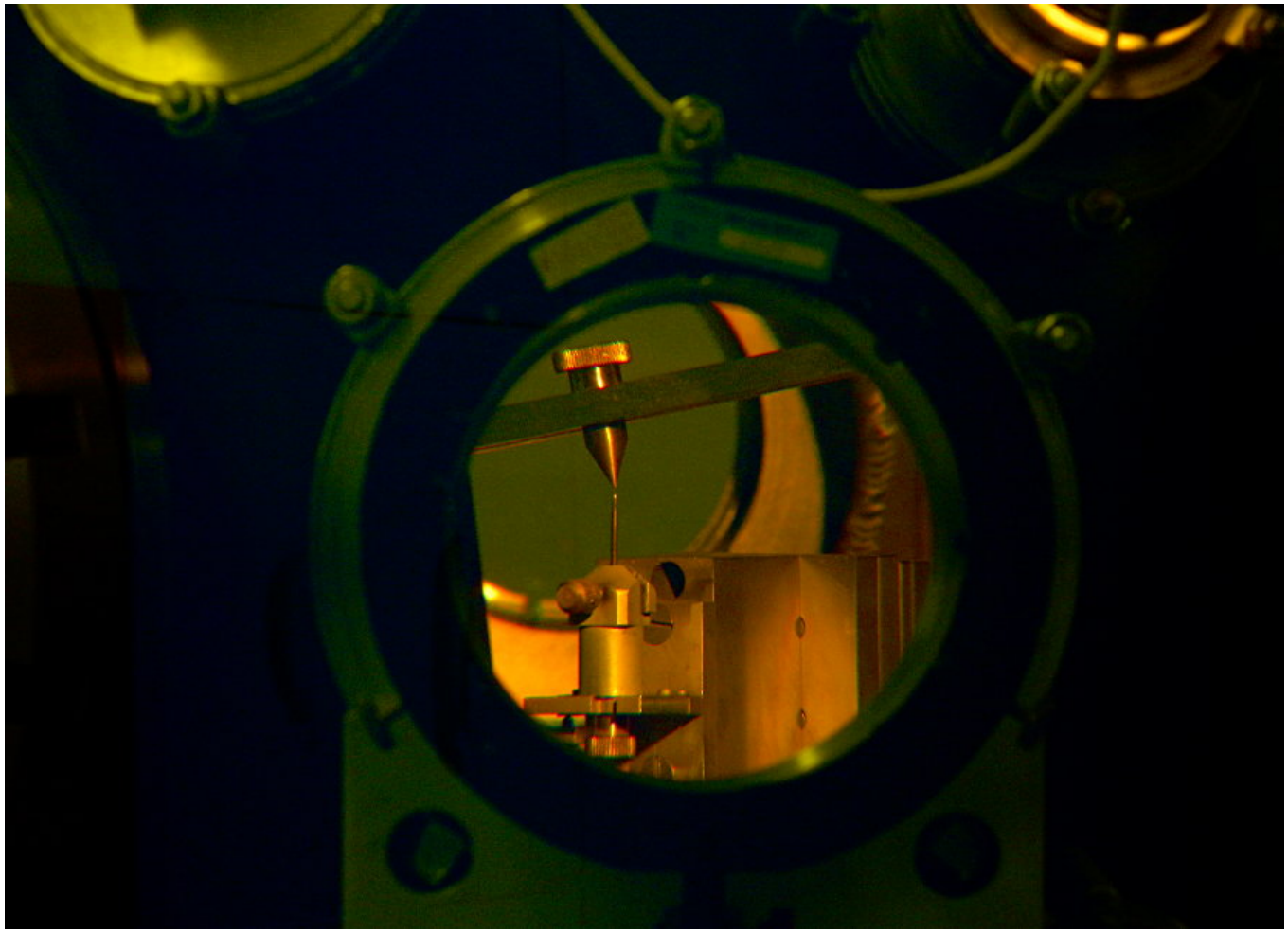
Prostřední profil: obtížné srovnání se simulací, v důsledku extrémních gradientů parametrů plazmatu.



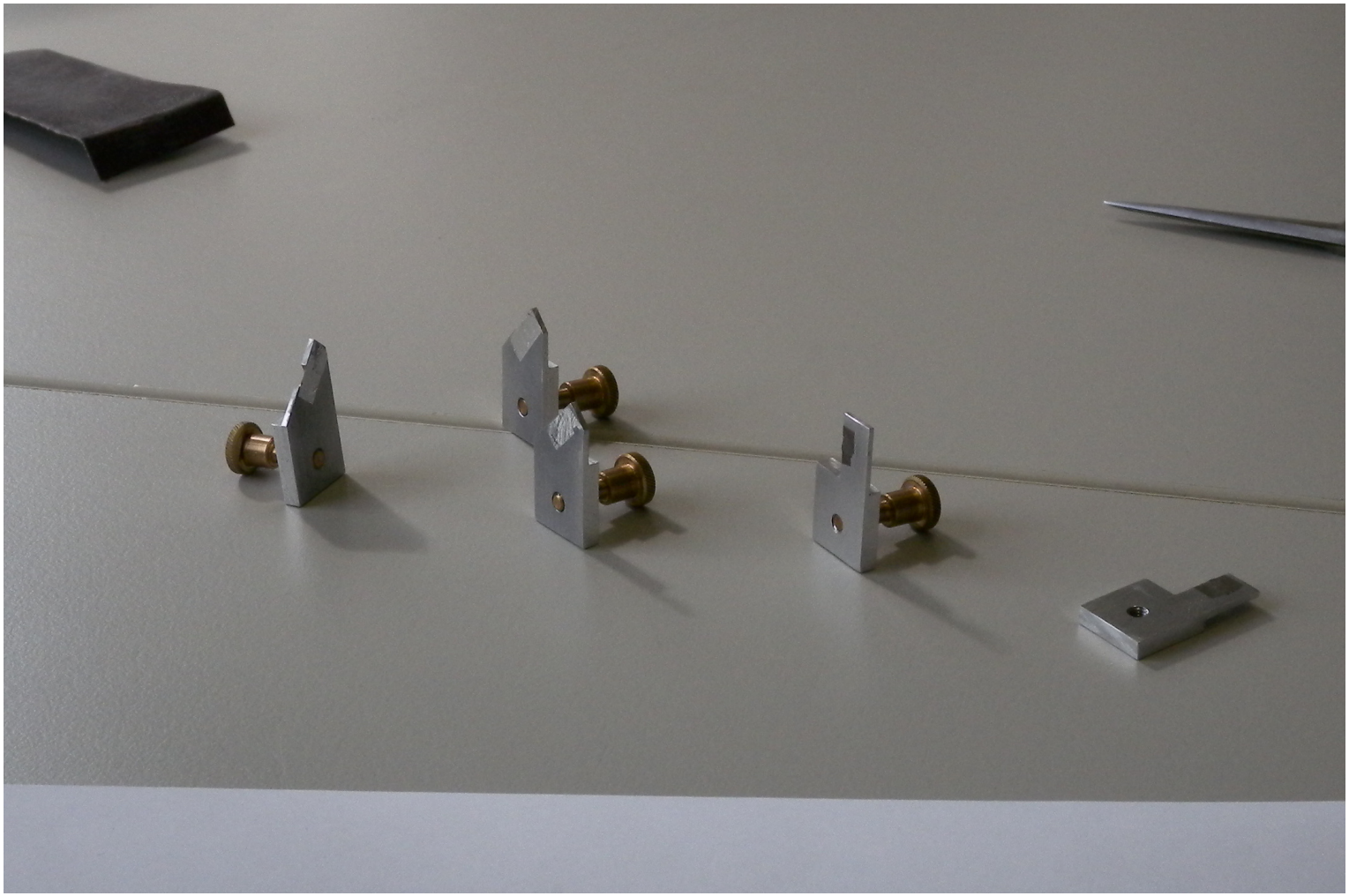
Fotografie - PALS



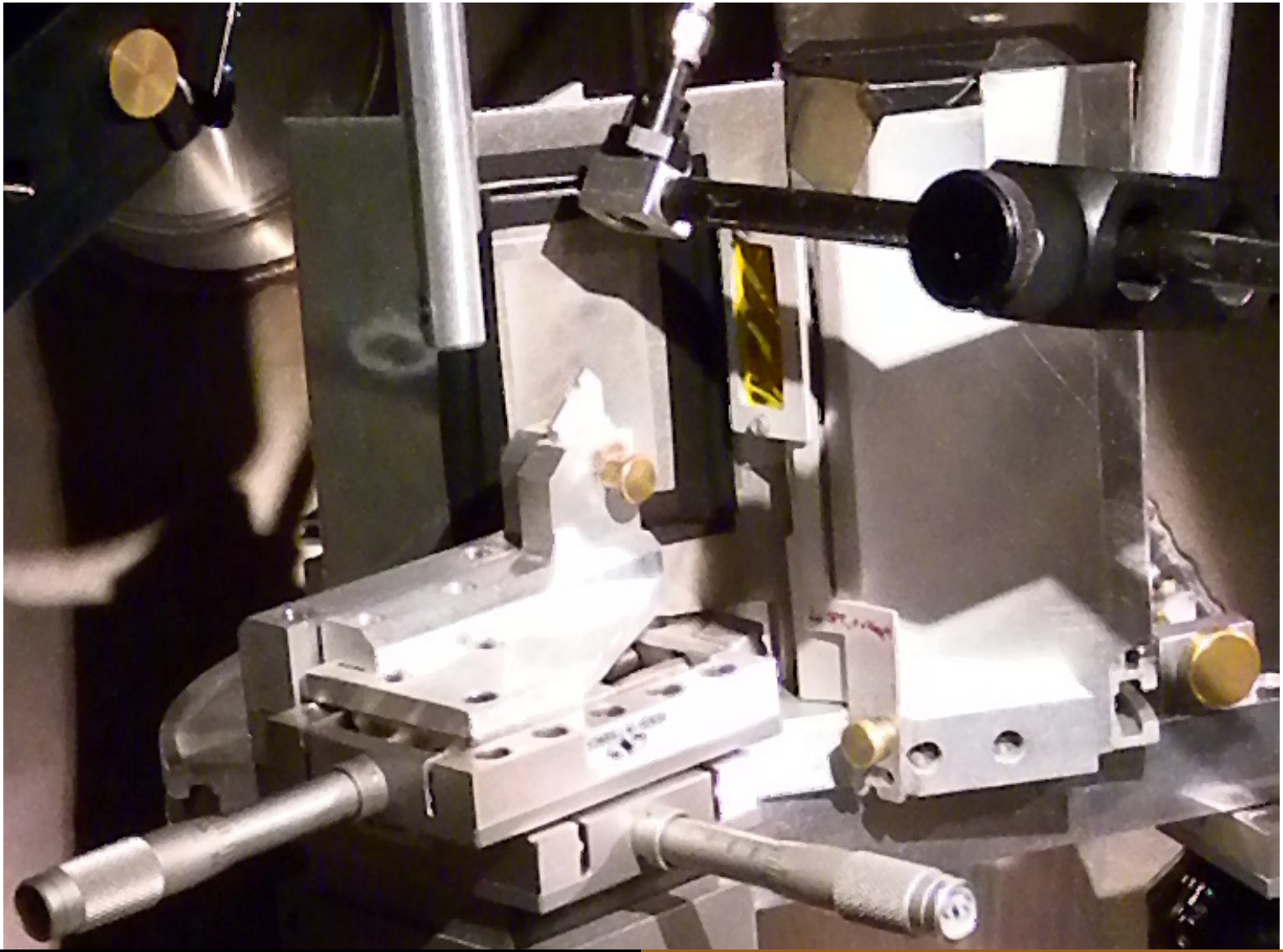
Fotografie - justáž spektrometru



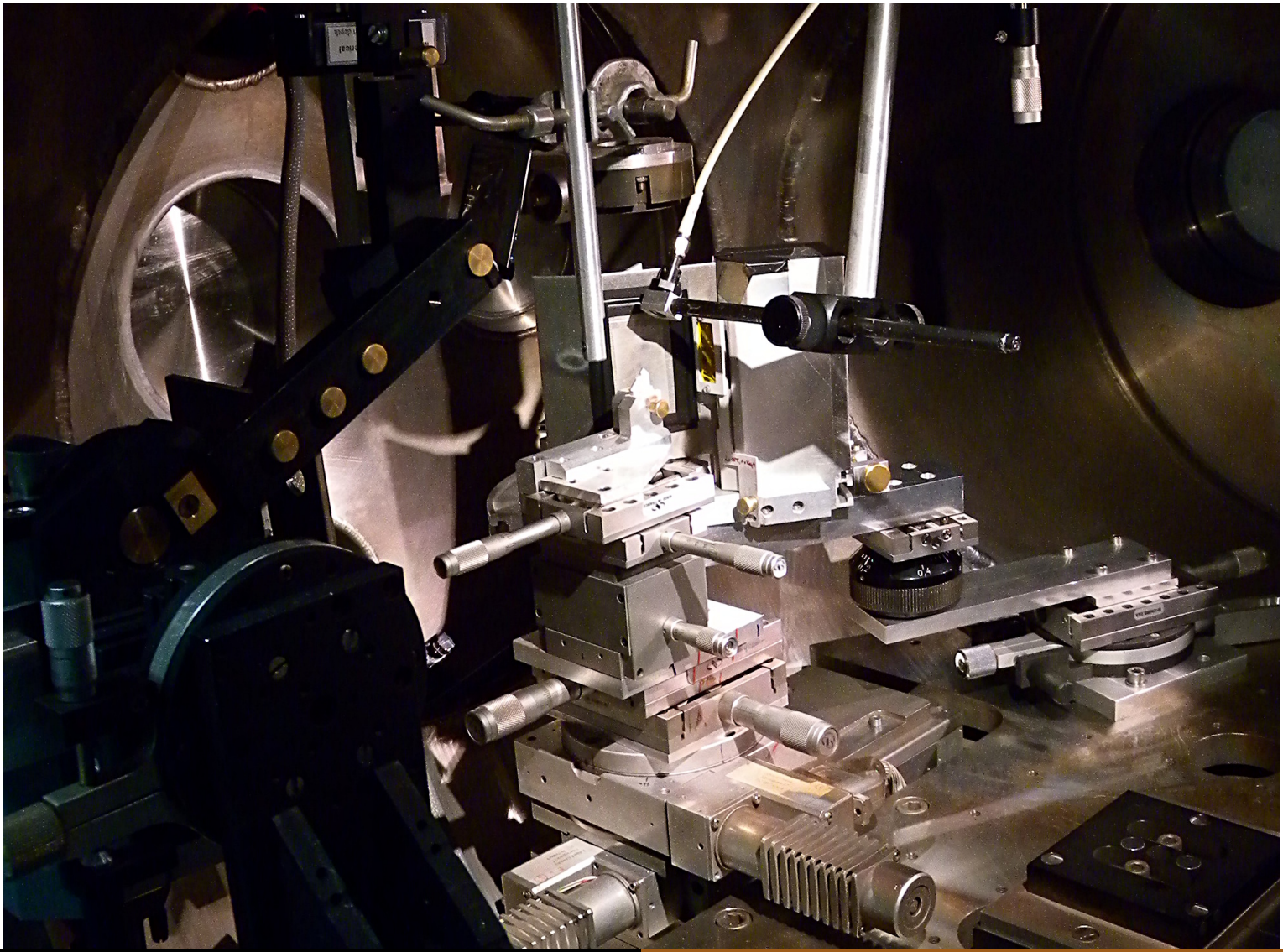
Fotografie - připravené terčíky



Fotografie - pohled do komory

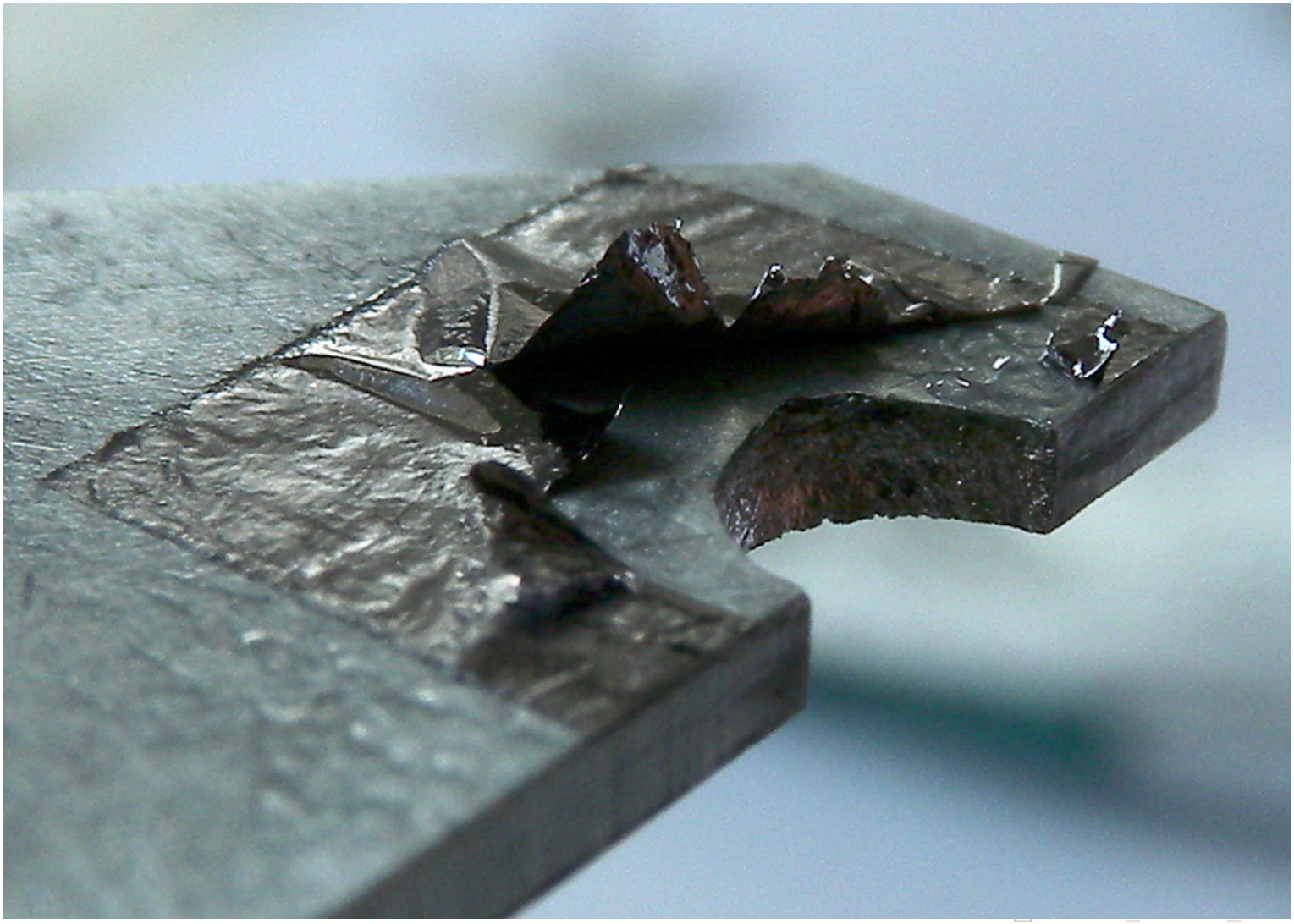


Fotografie - pohled do komory, celkový

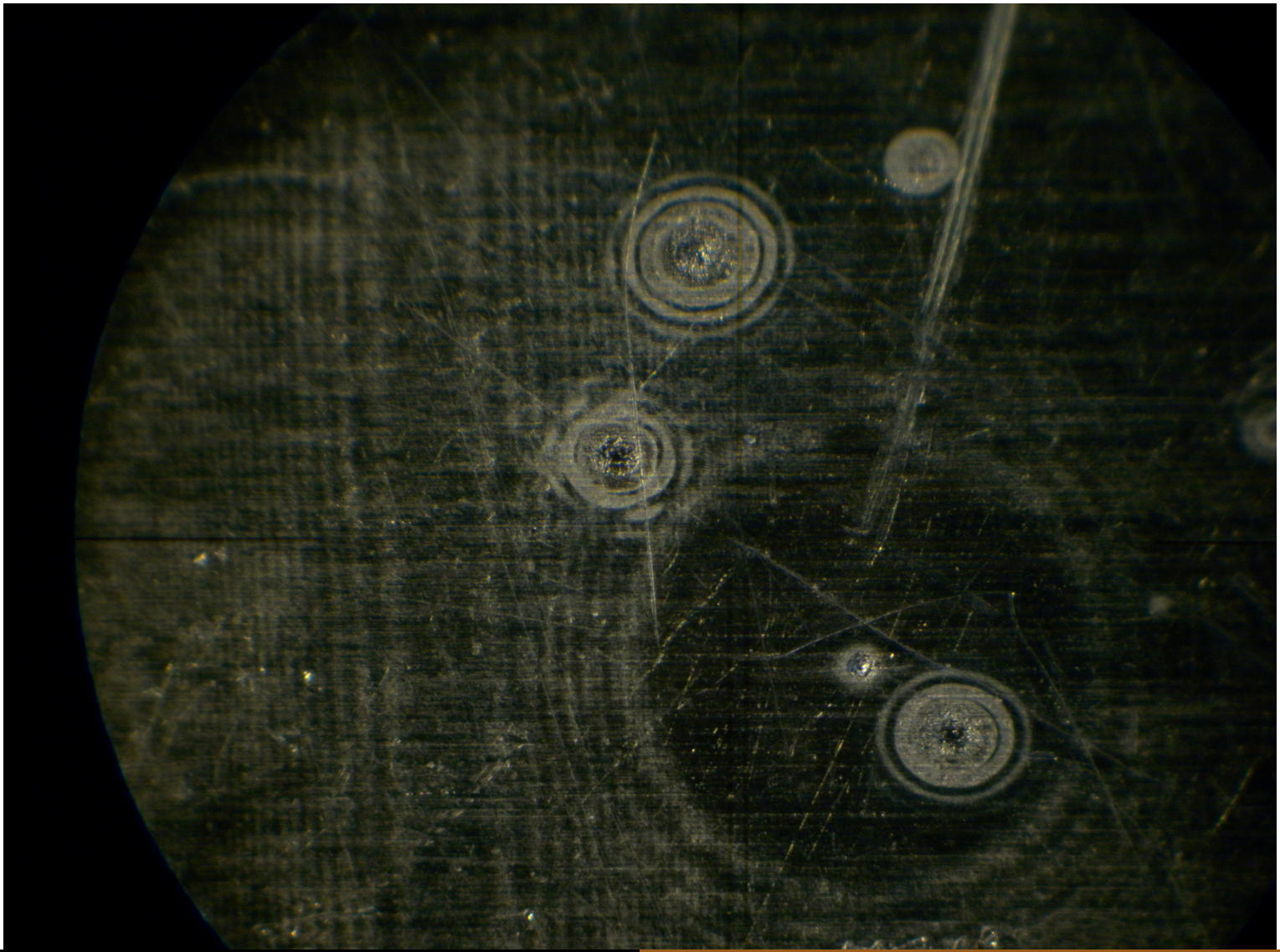


Fotografie - terčík po výstřelu (Al)

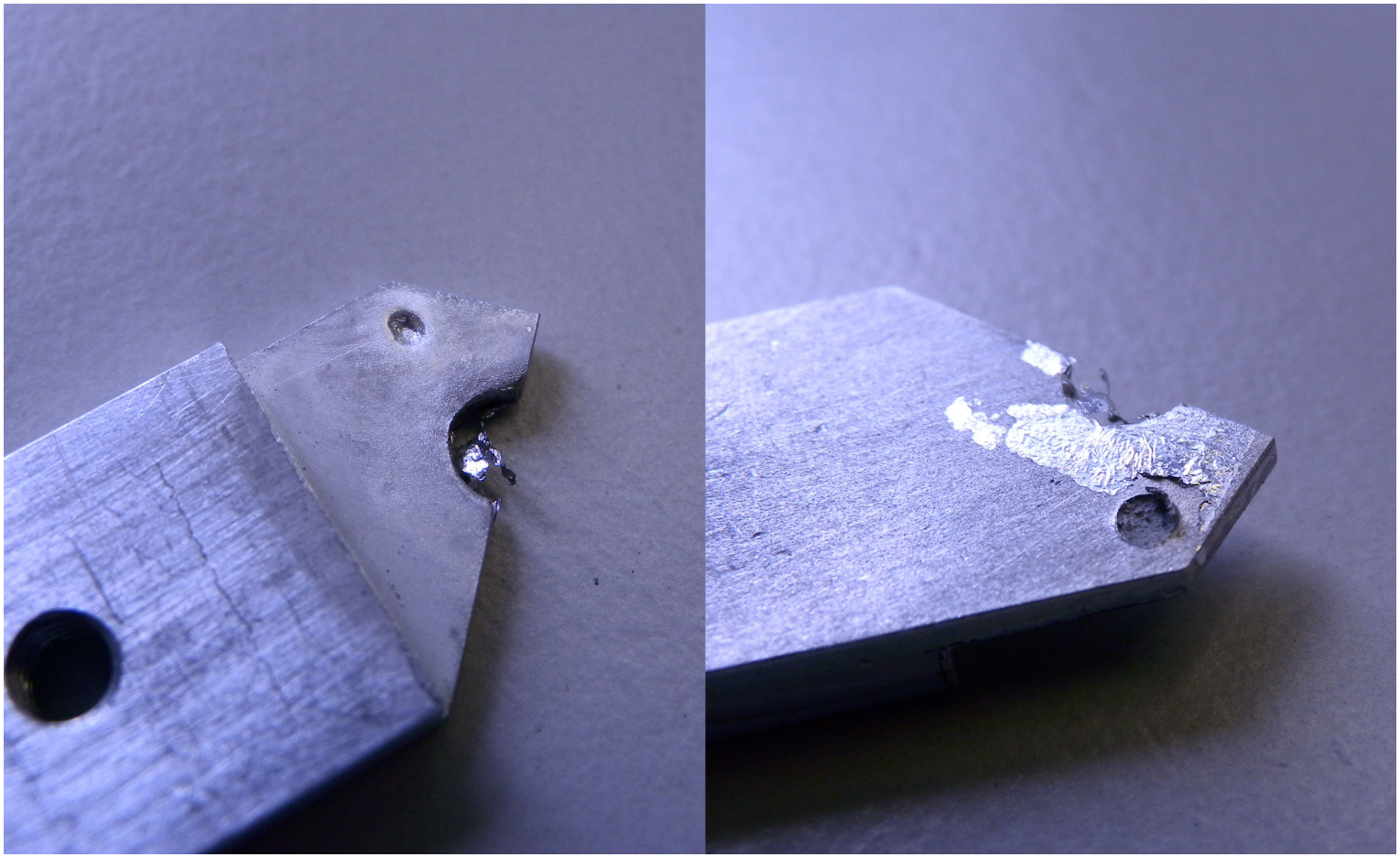
Fotografie - terčík po výstřelu (Ta)



Fotografie - identifikace ohniska



Fotografie - chybka

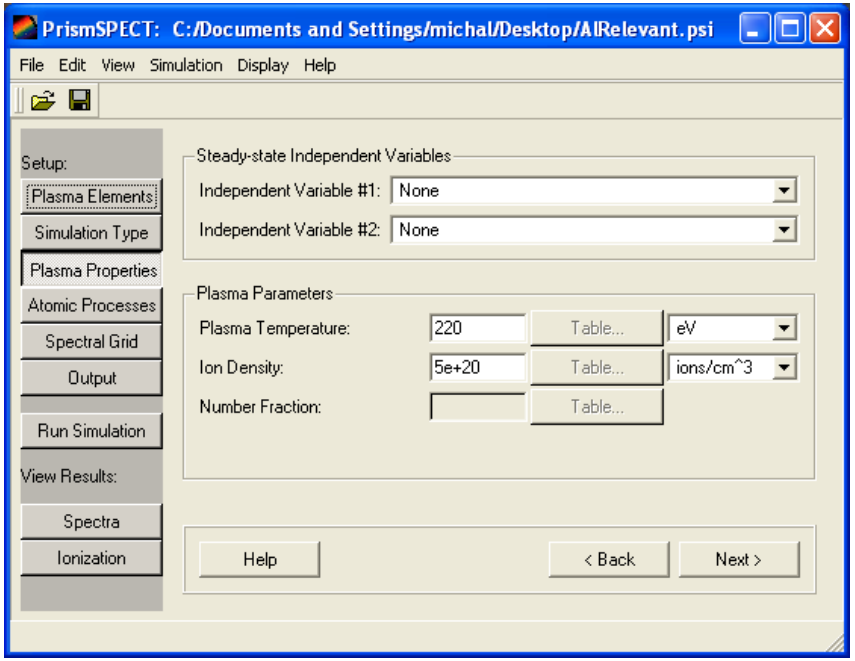


Simulace emise plazmatu

- Naměřená spektra jsou příliš komplikovaná pro přímé vyhodnocení.
- Nepřímé vyhodnocení: provede se simulace emise plazmatu s předpokládanými parametry, ta se poté srovná s naměřenými spektry.
- Druh vhodných simulací: Collisional radiative – vhodné pro plazma, které není ani v LTE (rovnovážné) ani v CE (řídké).
- Několik simulačních programů.

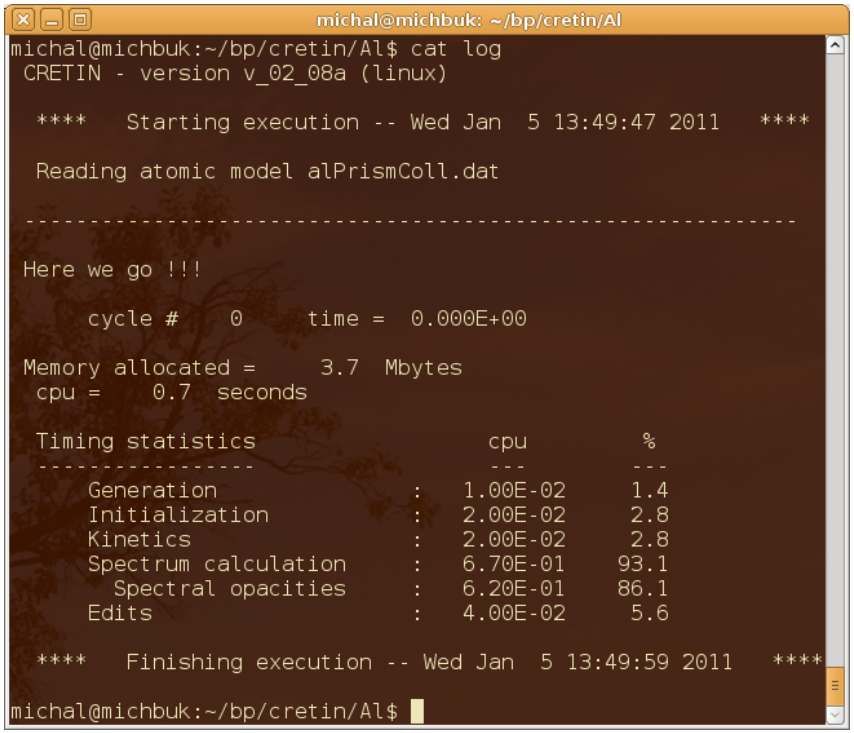
PrismSpect (Spect3D)

- Komereční CR-simulační program.
- User-friendly ovládání.
- Kvalitní atomová data.
- Nedostatečná dokumentace.
- Chybí některé možnosti nastavení.



Cretin [2]

- Distribuovaný ve formě zdrojového kódu.
- Ovládání přes příkazovou řádku, nastavení a parametry plazmatu se zadává v textovém souboru.
- Zabudovaná atomová data pro nás nejsou dostatečná.
- Širší možnosti konfigurace.



Plán

- Převzít atomová data z PrismSpectu a jiných zdrojů a použít je v programu Cretin.

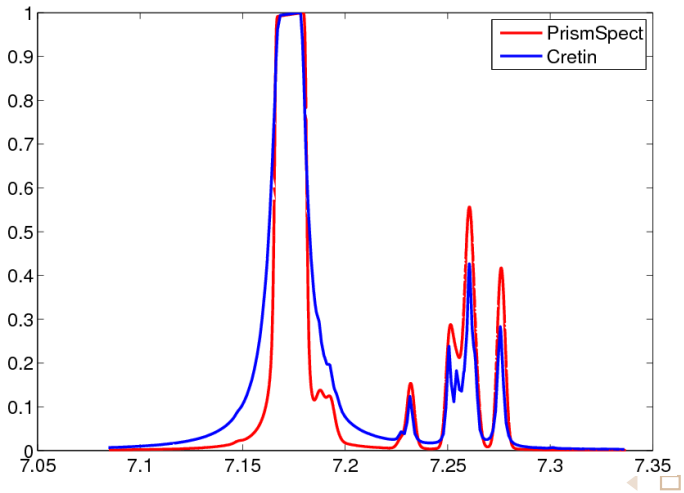
Postup

1. Přepsat relevantní atomové hladiny a síly přechodů mezi nimi. $\rightarrow$ LTE simulace.
2. Zahrnout pouze srážkovou excitaci a ionizaci. $\rightarrow$ primitivní CR simulace.
3. Postupně přidávat další relevantní procesy.

V každé fázi srovnat výsledná spektra a populace hladin mezi oběma kódy na jednoduché simulaci $(220\ \text{eV}, 5 \times 10^{20}\ \frac{\text{ions}}{\text{cm}^3})$ – ověření správnosti budovaného modelu.

1 LTE simulace

- Předpoklad lokální termodynamické rovnováhy, populace hladin jsou dány pomocí Sahovy rovnice.
- Platí v situacích, kdy srážkové procesy dominují nad radiačními.
- Stačí znát energie relevantních hladin, jejich statistické váhy a síly přechodů mezi nimi (oscillator strengths)



2 Collisional-radiative model

- Řeší vzájemně provázané sady rovnic pro populace ionizačních a excitačních stavů a radiačního transportu.
- Populační rovnice (rate equations):[3]

$$\frac{\mathrm{d}n_i}{\mathrm{d}t} = -n_i \sum_{j,j\neq i} W_{ij} + \sum_{j,j\neq i} n_j W_{ji} \tag{1}$$

- 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, ...

2 Collisional-radiative model

- Zahrneme-li do koeficientů W_{ij} pouze srážkovou (de)excitaci a (de)ionizaci, dostaneme tím stejné výsledky jako v LTE simulaci.[4]
- Koeficient pro srážkovou excitaci (zjednodušený) [5][6]:

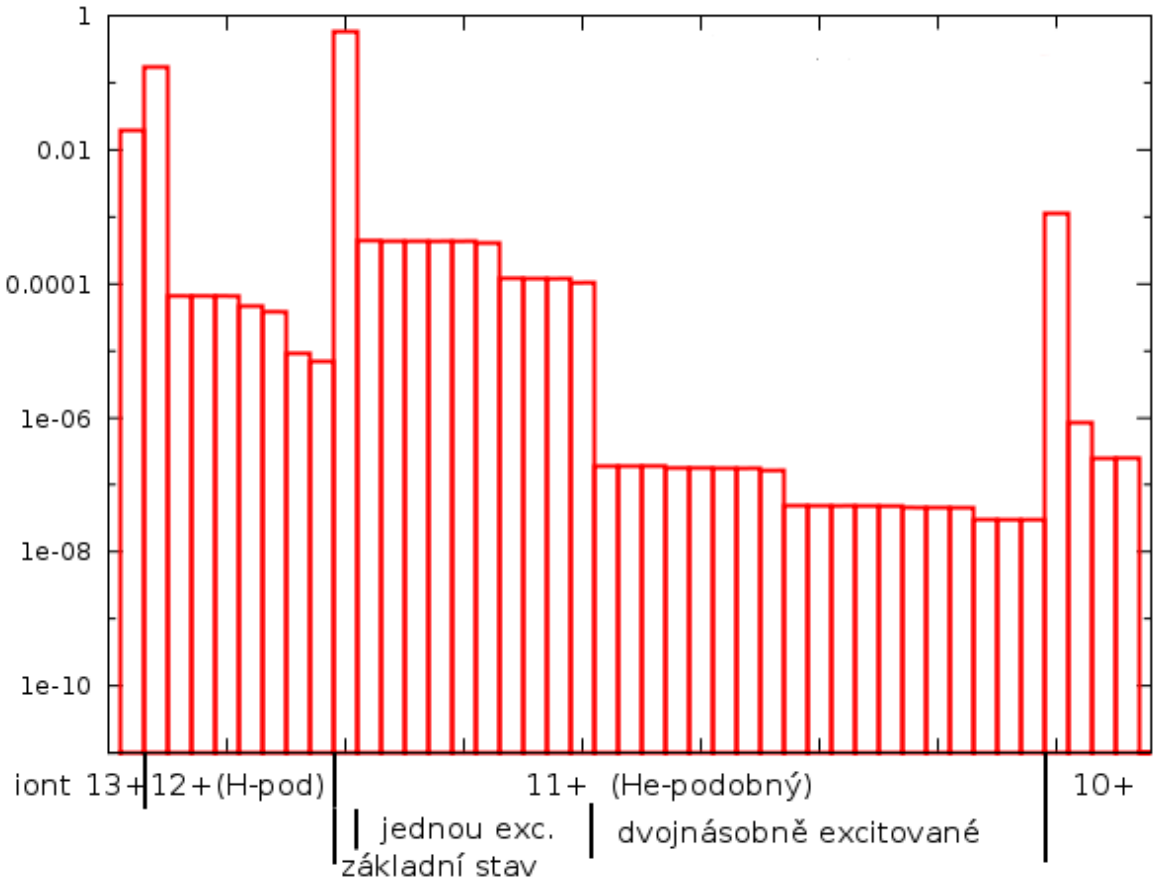
$$\varepsilon = \text{konst.} \frac{f}{\sqrt{T_e}\Delta E} \exp\left(\frac{\Delta E}{T_e}\right), \tag{2}$$

kde

- ΔE je rozdíl energií mezi hladinami přechodu
- T_e je elektronová teplota
- f je síla oscilátoru (oscillator strength, "překryv vlnových funkcí")

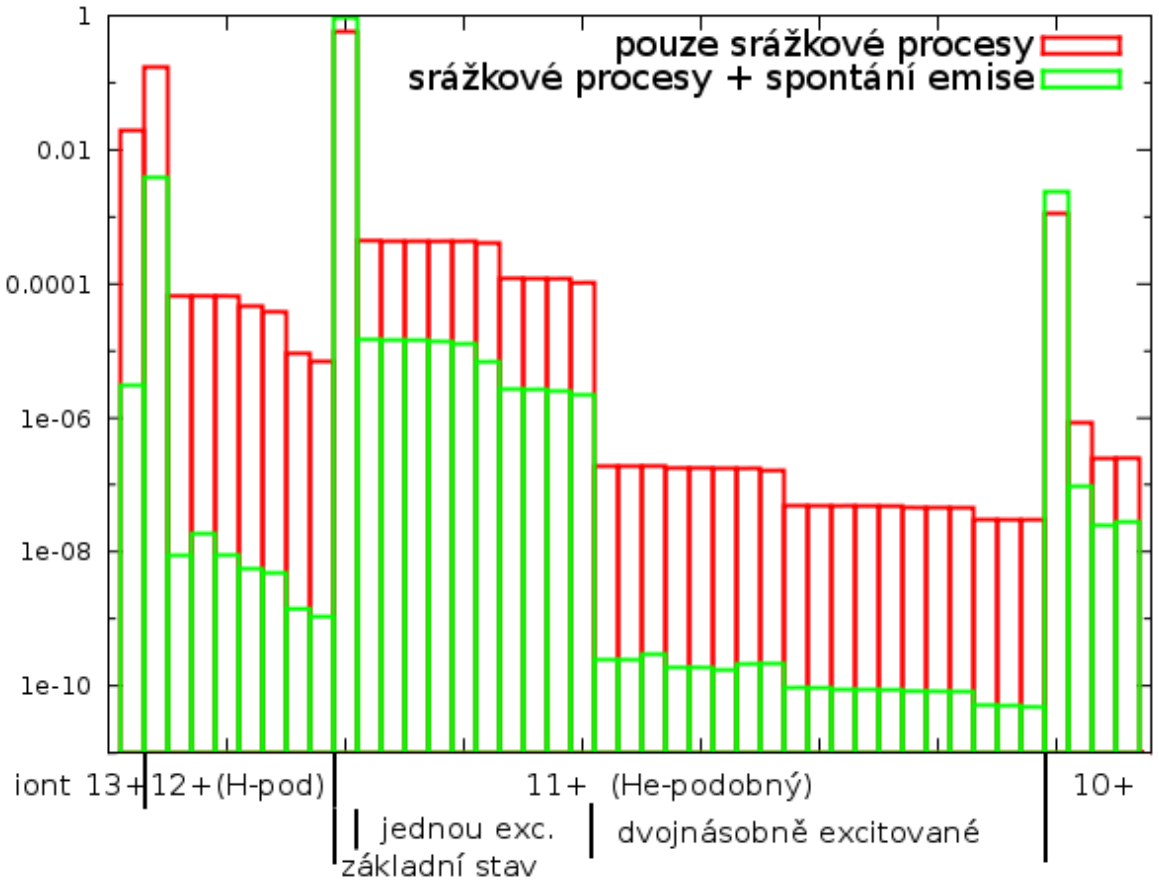
2 pouplace hladin

Obsazení hladin zahrnutých v modelu při LTE simulaci či CR s pouze srážkovými procesy.



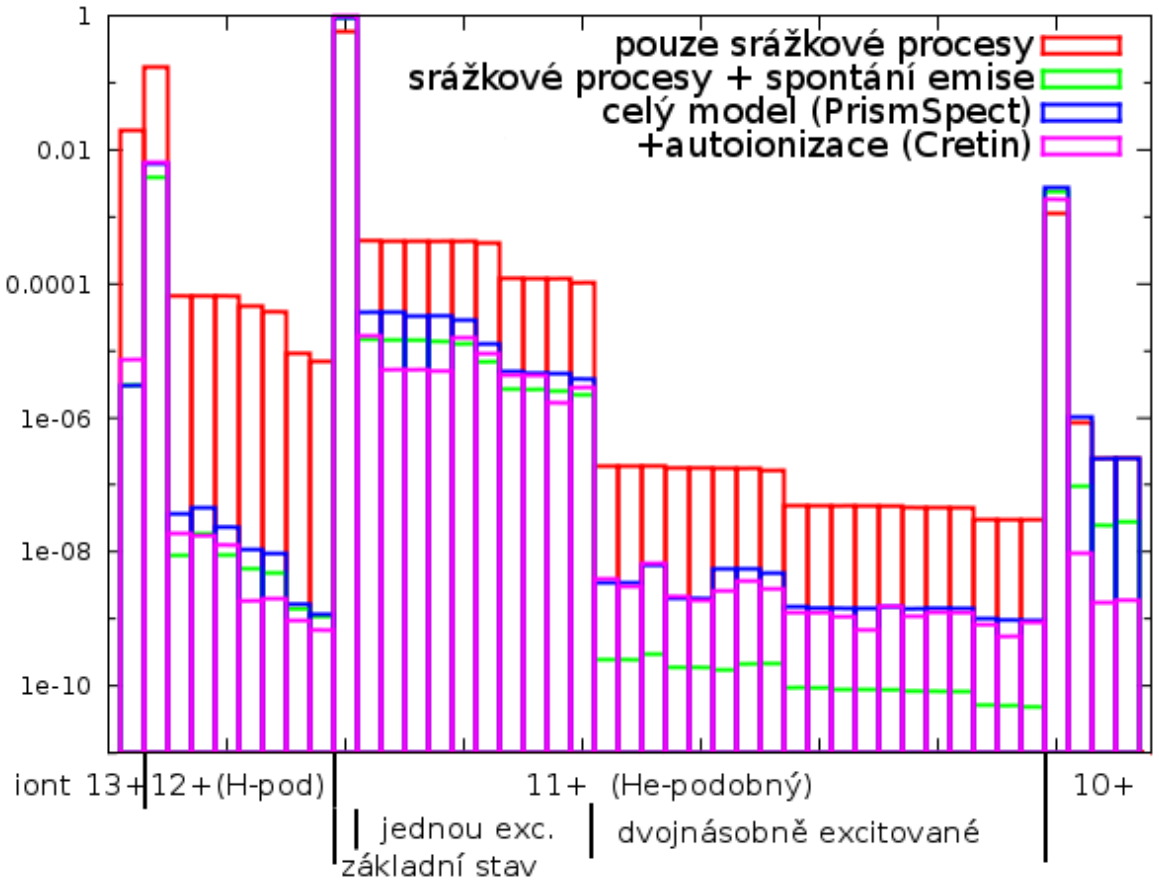
3 Přidání spontánní emise

Přidáme-li do modelu foto(de)excitace (čárové záření), hladiny excitovaných stavů se významně sníží.

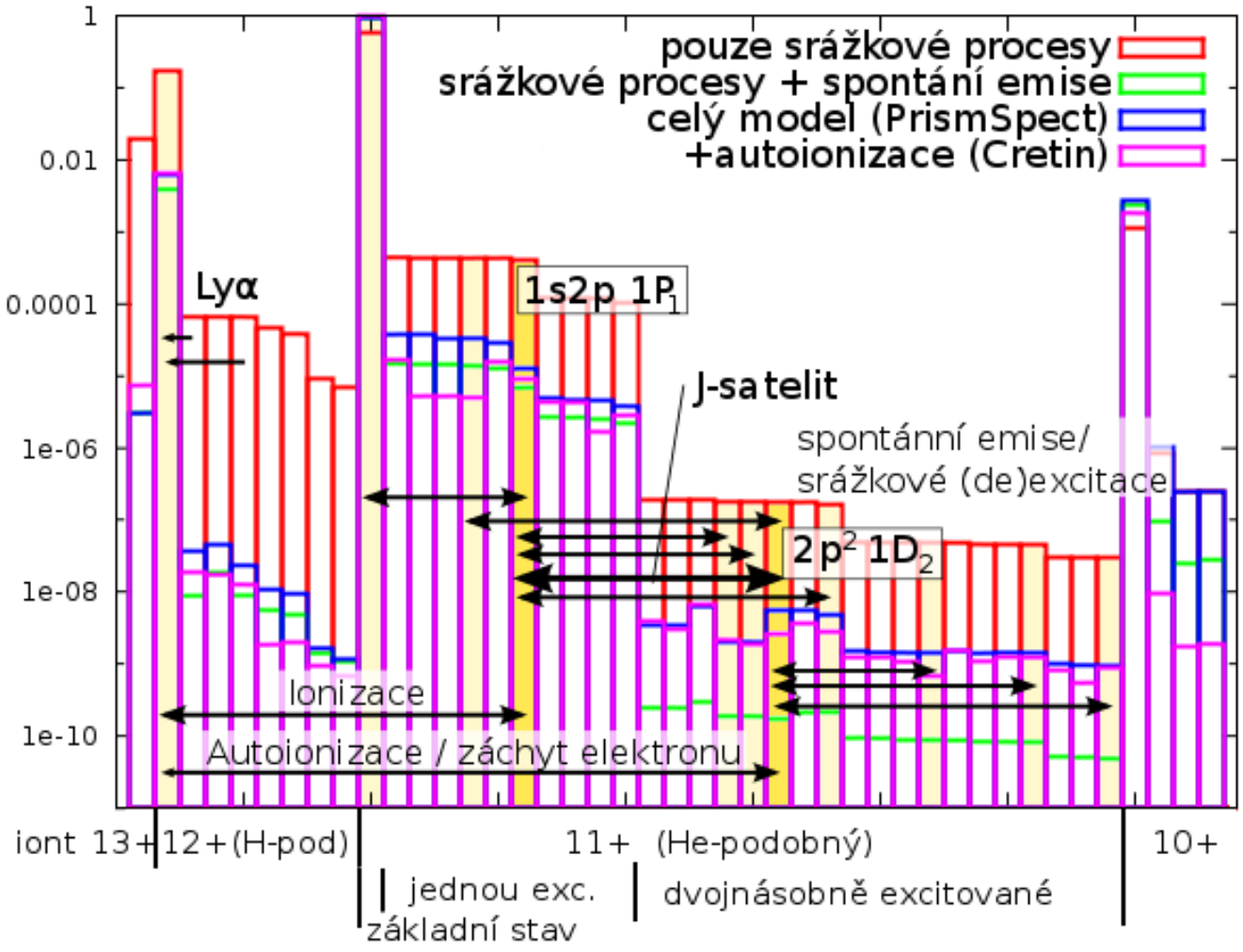


4 Plný collisional-radiative model

Dále přidáme autoionizaci/záchyt elektronu do dvojnásobně excitovaných stavů.



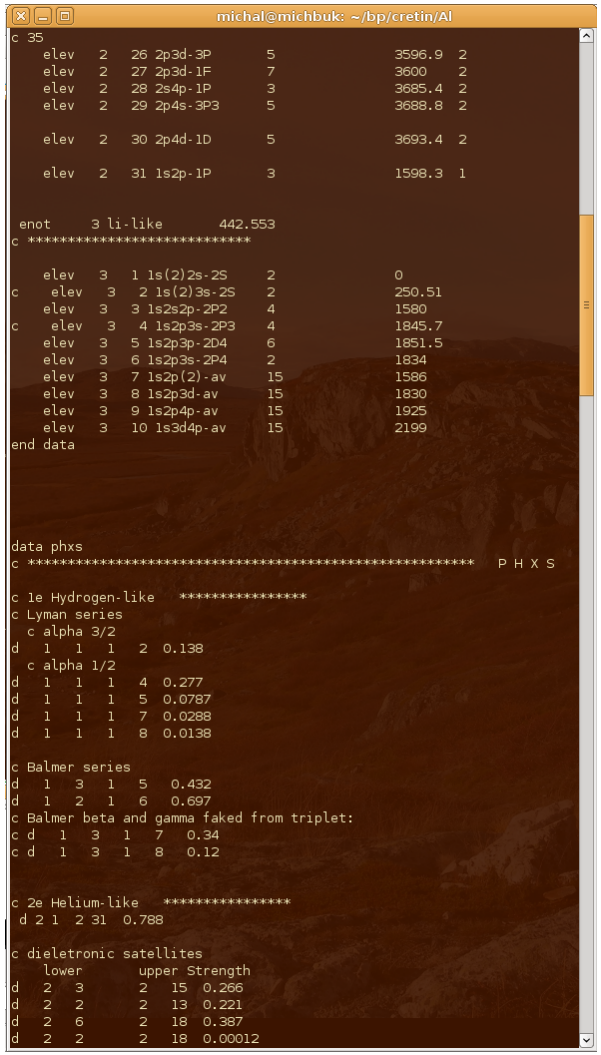
Přechody ovlivňující J – satelit



Problémy

Aneb proč to ještě nefunguje?

- Zatím nenalezena dostatečně vhodná literatura.
- Jednotky. (SI, CGS, J, eV, statcoulomb)
- Neúplná dokumentace Cretinu. (chybějící informace lze vyčíst ze zdrojového kódu)
- Komplikovaný systém ($\rightarrow$ chyby)



Zhodnocení uplynulého semestru

- Účast na experimentech (3 týdny v srpnu).
- Zprovoznění a nastudování kódu Cretin.
- Tvorba atomového modelu vhodného pro naše účely.
- Drobné práce na vyhodnocování dat z experimentů.

Plány do budoucna

- Dodělání atomového modelu (doufejme) do konce ledna.
- Simulace spekter plazmatu s velkými gradienty, na základě hydrodynamických simulací doc.Lisky.

Použitá literatura

O. Renner et al.

High-luminosity, high-resolution, x-ray spectroscopy of laser-produced plasma by vertical-geometry johann spectrometer.
Rev. Sci. Instrum., 68 (6):2393, June 1999.

H.A.Scott.

Cretin—a radiative transfer capability for laboratory plasmas.
Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 71:689, 2001.

H.K.Chung et al.

The how to for flychk.
http://nlte.nist.gov/FLY/, 2008.

F.B.Rosmej.

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

D. Salzmann.

Atomic Physics in Hot Plasmas.
Oxford University Press, 1998.

H.R. Griem.

Principles of Plasma Spectroscopy.
Cambridge University Press, 1997.

Konec

- Děkuji za pozornost.