

Urychlené částice z pohledu sluneční rentgenové emise

Elektronová spektra

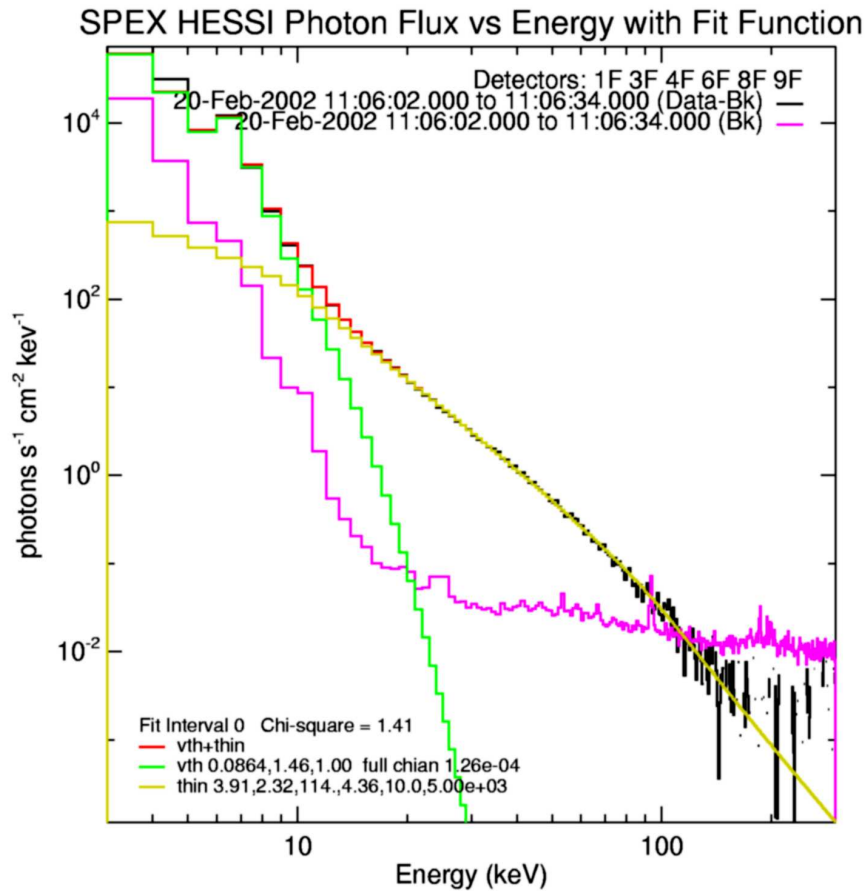
Jana Kašparová

Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov

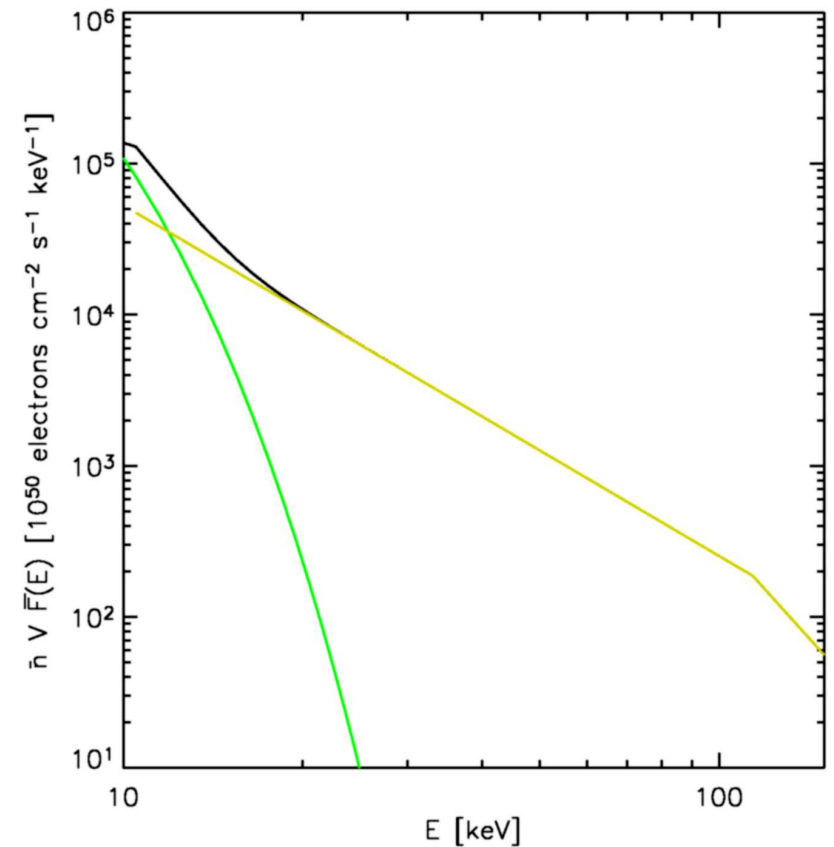
kasparov@asu.cas.cz

ODVOZENÍ ELEKTRONOVÉHO SPEKTRA

- forward fitting
 - parametrizace $\overline{F}(E)$, $\mathcal{F}_0(E_0)$
 - double power-law, isothermální plasma, ... $\Rightarrow \delta_1, \delta_2, \bar{n}V\overline{F}, T, EM, \dots$



$$I(\epsilon) \Rightarrow \overline{F}(E)$$



INVERZNÍ PROBLÉM

- hledání řešení rce

$$I(\epsilon) = \frac{\bar{n}V}{4\pi R^2} \int_{\epsilon}^{\infty} \bar{F}(E) \sigma(\epsilon, E) dE \quad A\bar{F} = I$$

- Kramers $\sigma(\epsilon, E)$

$$\frac{\bar{F}(E)}{E} = -\frac{4\pi R^2}{\bar{n}V} \left[\frac{d[I(\epsilon)\epsilon]}{d\epsilon} \right]_{\epsilon=E}$$

- pro fyzikální $\bar{F} \geq 0$: $d[I(\epsilon)\epsilon]/d\epsilon \leq 0 \quad \forall \epsilon$, další viz Brown & Emslie (1988)
- “ill-posed” úloha
 - neexistuje jediné řešení
- “ill-conditioned” úloha
 - nestabilní vzhledem k šumu v I (ω “frekvence” šumu v energii)

$$L(\epsilon) = I(\epsilon)\epsilon = L_0(\epsilon) + L_1 \exp(i\omega\epsilon) \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta\bar{F}}{\bar{F}} = \omega \frac{L_1}{L'_0} \xrightarrow{\omega \rightarrow \infty} \infty$$

- vysokofrekvenční šum degraduje řešení
 - “ostrá” struktura v \bar{F} je potlačena díky integračnímu kernelu σ
 - nutnost vysokého spektrálního rozlišení a vysokého poměru signálu k šumu

REGULARIZOVANÁ INVERZE

- potlačení numerické nestability
 - řešení pro problém “nejmenších čtverců” + podmínky na řešení (Tichonovova regularizace)

$$\|A\bar{F} - I\|^2 + \lambda \|L\bar{F}\|^2 = \min$$

- λ Lagrangeův multiplikátor, regularizační parametr
- řešení \bar{F}_λ pomocí GSVD (generalised singular value decomposition)
- hodnota λ např. pomocí “discrepancy principle” nebo “cumulative residuals”

$$\|A\bar{F}_\lambda - I\|^2 = \|\delta I\|^2 \quad S_\lambda^k = 1/k \sum_{i=1}^k r_\lambda^i$$

- operátor L
 - $L \equiv 1$, **zero order regularisation**, podmínka na celkový tok
 - $L \sim D^1$, **first order regularisation**, diferencovatelnost \bar{F} (pro odvození \mathcal{F}_0)

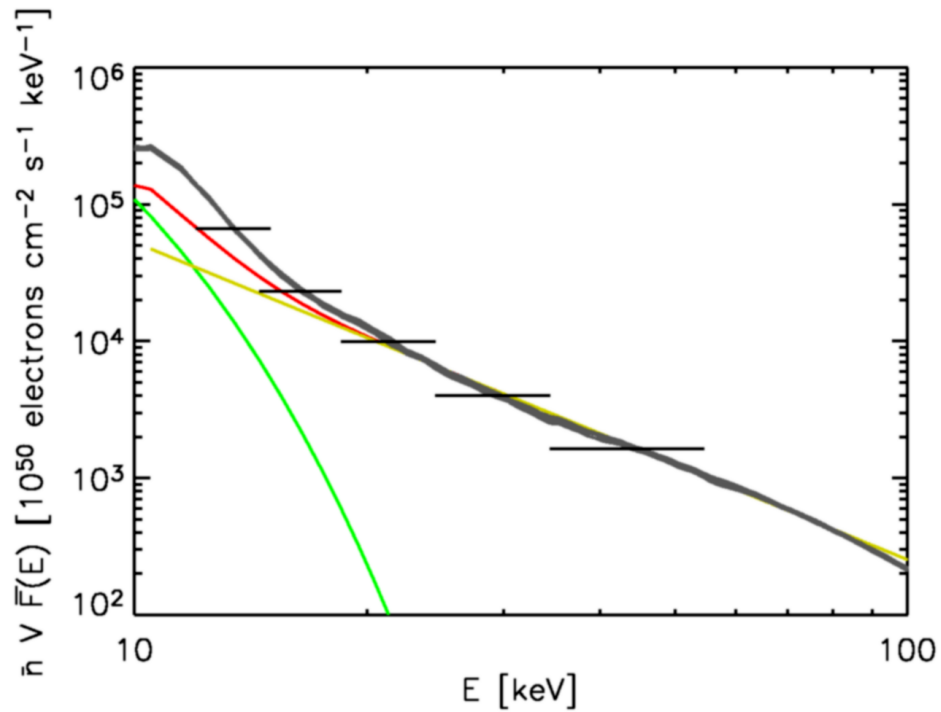
$$\mathcal{F}_0 \propto -\frac{d}{dE} \left[\frac{\bar{F}(E)}{E} \right]$$

- $L \sim D^2$, **second order regularisation**, diferencovatelnost \mathcal{F}_0

REGULARIZOVANÁ INVERZE II

- inverze $I(\epsilon) \rightarrow \overline{F}(E)$, $N_E > N_\epsilon$
 - elektron o energii $E > \epsilon$ přispívá k fotonové emisi na ϵ
 - fotonové spektrum obsahuje informace o elektronovém spektru na větším energetickém rozsahu
- “forward fitting” = “high order regularisation”
 - D^k , redukce řešení na $N - k$ rozměr
 - řešení popsáno několika parametry (např. 5-ti pro tenký terč)
- inverze $C(e) \rightarrow I(\epsilon)$
 - regularizovaná inverze “detector response matrix”
- inverze $C(e) \rightarrow \overline{F}(E)$
 - regularizovaná inverze “detector response matrix” + bremsstrahlung
- index $\gamma(\epsilon)$ (Kontar & MacKinnon, 2005)
 - formulace podobná second order regularisation

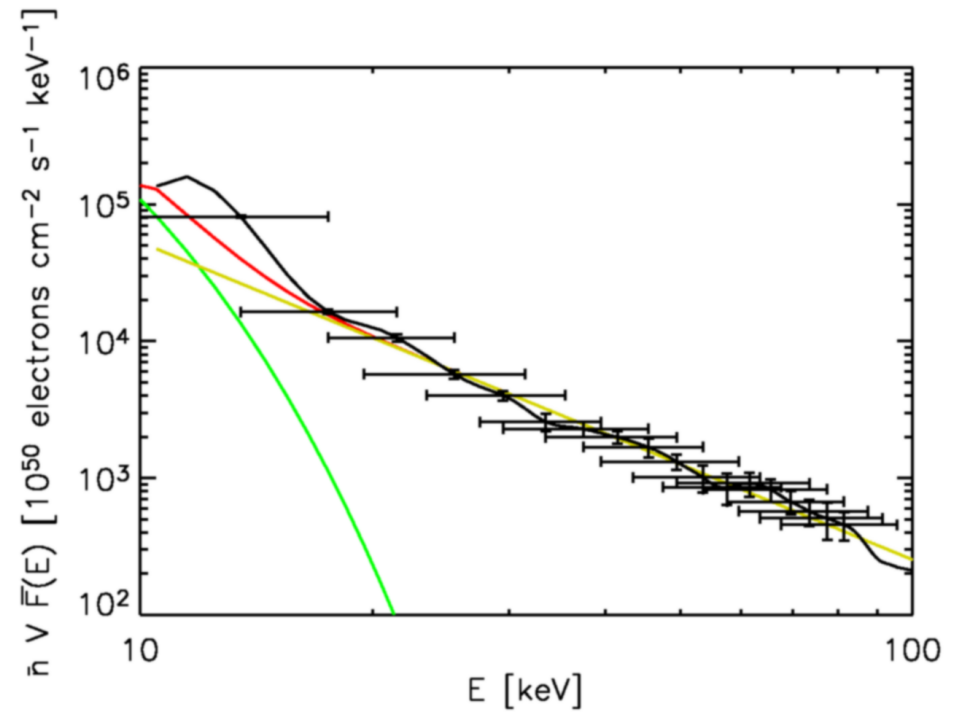
REGULARIZOVANÁ INVERZE - PŘÍKLADY



$$I(\epsilon) \rightarrow \bar{F}(E)$$

zero order

Piana et al. (2003)



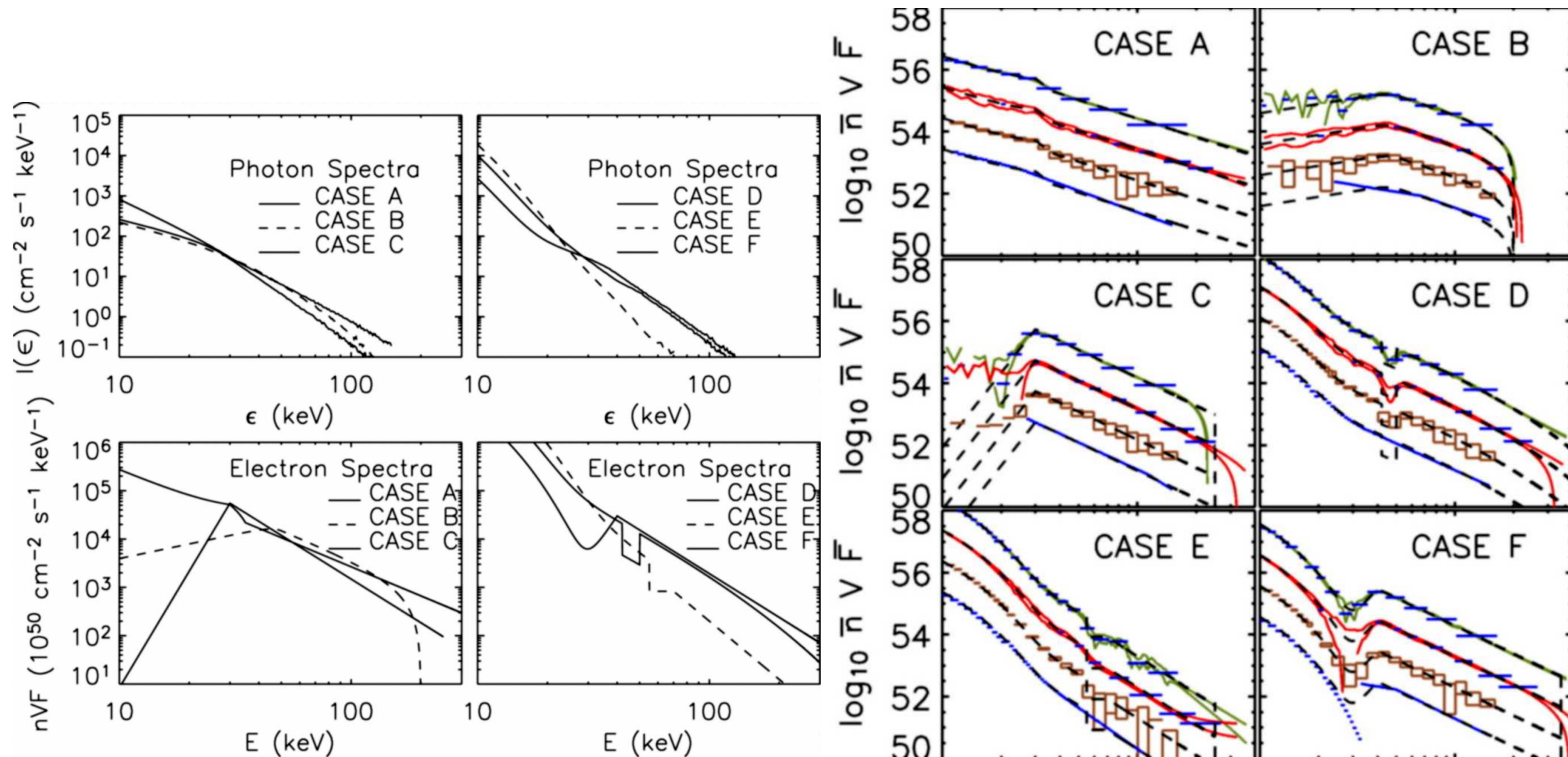
$$C \rightarrow \bar{F}(E)$$

zero, first, second order

Kontar et al. (2005)

REGULARIZOVANÁ INVERZE - PŘÍKLADY

- “Blind paper” - Brown et al. (2006)



- ztráta energie svazku: dominují Coulombické srážky, zejména e-e
 - 2-částicová srážka: M - terč, m testovací částice, ionizovaný terč

$$\frac{dE}{dt} \propto -\frac{1}{E} \frac{m}{M} n v \quad \frac{dv_{\parallel}}{dt} \propto -\frac{1}{E^2} \left(1 + \frac{m}{M}\right) n v^2$$

- srážky: e-e, e-p, zanedbání členů $m_e/m_p \Rightarrow$ pouze e-e v členu dE/dt

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{C}{E} n v \quad \frac{dv_{\parallel}}{dt} = -\frac{3C}{2E^2} n v^2 \quad C \sim \ln \Lambda$$

- $dN = n v_z dt$, $\mu = v_z/v$, $dv_z = \mu dv_{\parallel}$

$$\frac{dE}{dN} = -\frac{C}{\mu E} \quad \frac{d\mu}{dN} = -\frac{C}{E^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{E}{E_0} \quad E = E_0 \left(1 - \frac{3CN}{\mu_0 E_0^2}\right)^{1/3}$$

- elektrony jsou zabržděny na sloupcové hustotě

$$N_{\text{stop}} = \mu_0 E_0^2 / 3C \sim 10^{17} \mu (E_0/\text{keV})^2 \text{ cm}^{-2}$$

- $\mu = 0$ (isotropické rozdělení)

- “energy deposit rate” $I_B(N)$ [erg cm⁻³s⁻¹]

$$I_B(N) = \int_E n_e \left| \frac{dE}{dt} \right| dE = n \int_E \mu F(E) \left| \frac{dE}{dN} \right| dE \quad F(E) = n_e(E) v_e$$

- rce kontinuity pro elektronový tok podél směru z , $\mathcal{F}_0(E_0)/S = F_0(E_0)$

$$\mu F(E) dE = \mu_0 F_0(E_0) dE_0 \quad F_0(E_0) = \begin{cases} (\delta - 2) \frac{\mathcal{F}}{E_c} \left(\frac{E_0}{E_c} \right)^{-\delta} & : E \geq E_c \\ 0 & : E < E_c \end{cases}$$



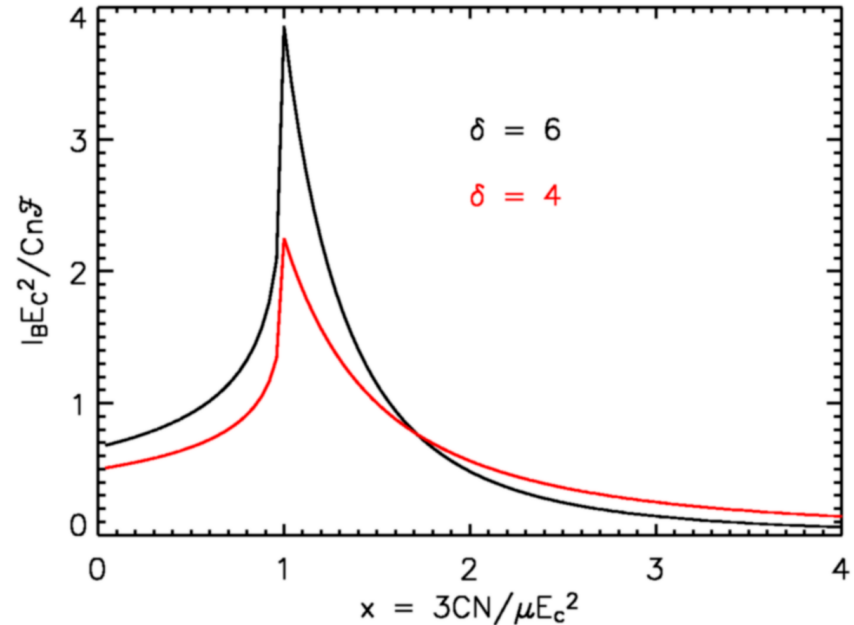
$$I_B(N) = Cn \int_{E_0} \frac{F_0(E_0)}{E_0 \left(1 - \frac{3CN}{\mu_0 E_0^2} \right)^{2/3}} dE_0 = \frac{1}{2} Cn (\delta - 2) \frac{\mathcal{F}}{E_c^2} B_x(\delta/2, 1/3) \left(\frac{N}{N_c} \right)^{-\delta/2}$$

- $x = \min(3CN/\mu_0 E_c^2, 1)$, $N_c = \mu_0 E_c^2/3C$, B_x nekompletní Beta funkce

$$B_x(a, b) = \int_0^x y^{a-1} (1-y)^{b-1} dy$$

OHŘEV PLASMY SVAZKEM III

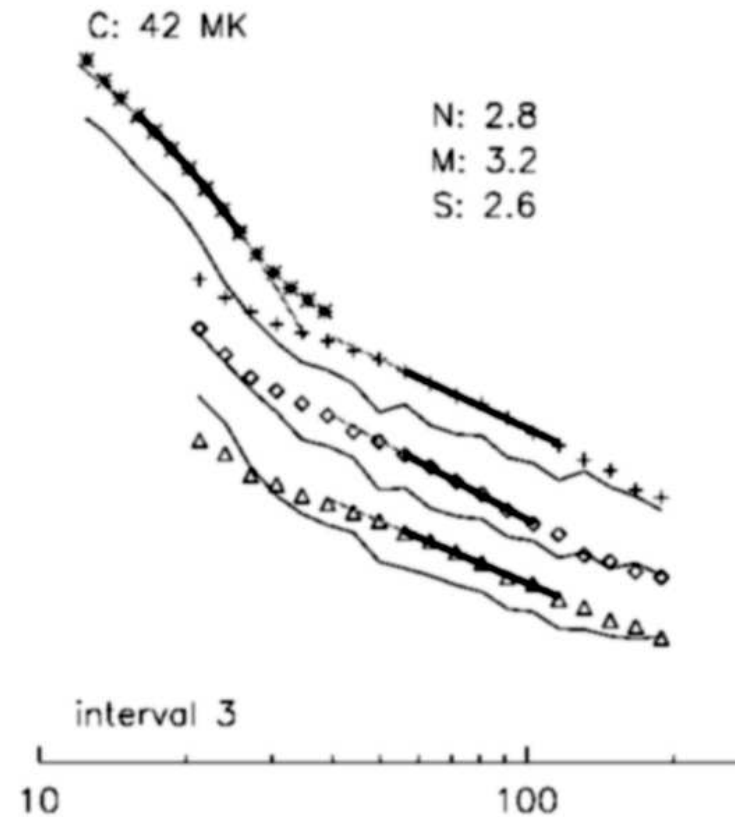
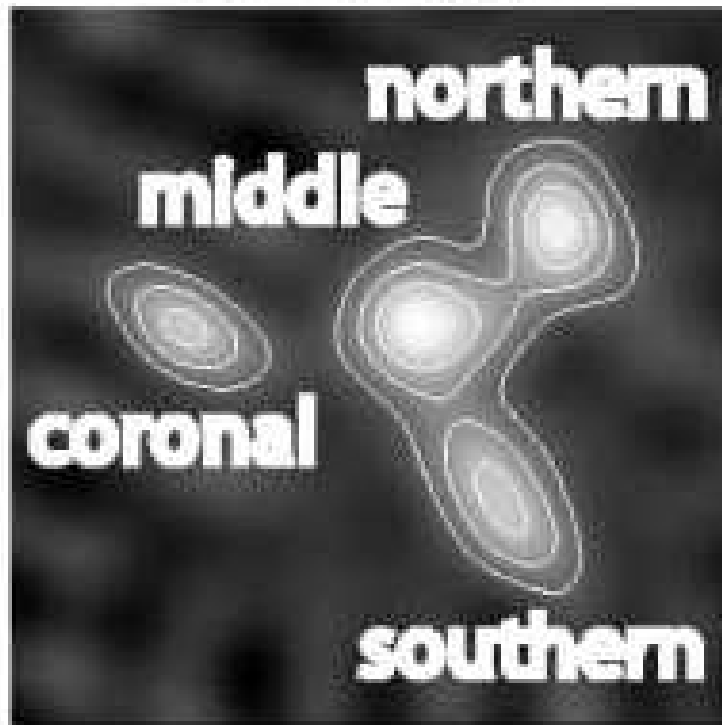
Energy deposit rate $I_B(N)$

- $N \ll N_c$: $I_B(0) \sim Cn(\delta - 2)\mathcal{F}/(E_c^2\delta)$,
není změna F_0
 - maximum v $N = \mu_0 E_c^2 / 3C$
 - roste díky zpomalování elektronů
 - pro $N > N_c$ pokles kvůli úbytku elektronů ze svazku
- 
- N_{tr} sloupcová hustota přechodové oblasti (strmý nárůst teploty), $N_c \leq N_{tr}$
 - elektrony s $E_0 \leq \sqrt{3CN_{tr}/\mu_0}$ ohřívají koronu, kde je nízká n , pomalé zářivé, konduktivní ztráty \Rightarrow korona akumuluje energii, **Neupertův efekt**
$$\text{tok v SXT (t)} \propto \int_t \text{tok v HXR (t)} dt$$
 - elektrony s $E_0 > \sqrt{3CN_{tr}/\mu_0}$ ohřívají chromosféru, expanze plasmy “chromospheric evaporation”, nárůst N_{tr} , E_{tr} , pokles účinnosti ohřevu

IMAGING SPECTROSCOPY

- spektra z jednotlivých hard X-ray zdrojů, v závislosti na výšce z
- model tlustého terče: hard X-ray zdroj v koroně (tenký terč) a silná hard X-ray emise z chromosféry

36–41 keV



Emslie et al. (2003)

- $\gamma_N - \gamma_S \sim 0.3 \Rightarrow$ šíření svazku skrz větší N
 - větší hustota v S-části smyčky, větší vzdálenost od místa urychlení

IMAGING SPECTROSCOPY II

Odvození $n(z)$ z pozic hard X-ray zdrojů

- Brown et al. (2002), Aschwanden et al. (2002)
- limitní případ $\mu \equiv 1$

$$E(E_0, N) = \sqrt{E_0^2 - 2CN}$$

- fotony s energií ϵ produkovány elektrony o energii $E \sim \epsilon$ (strmé elektronové spektrum)

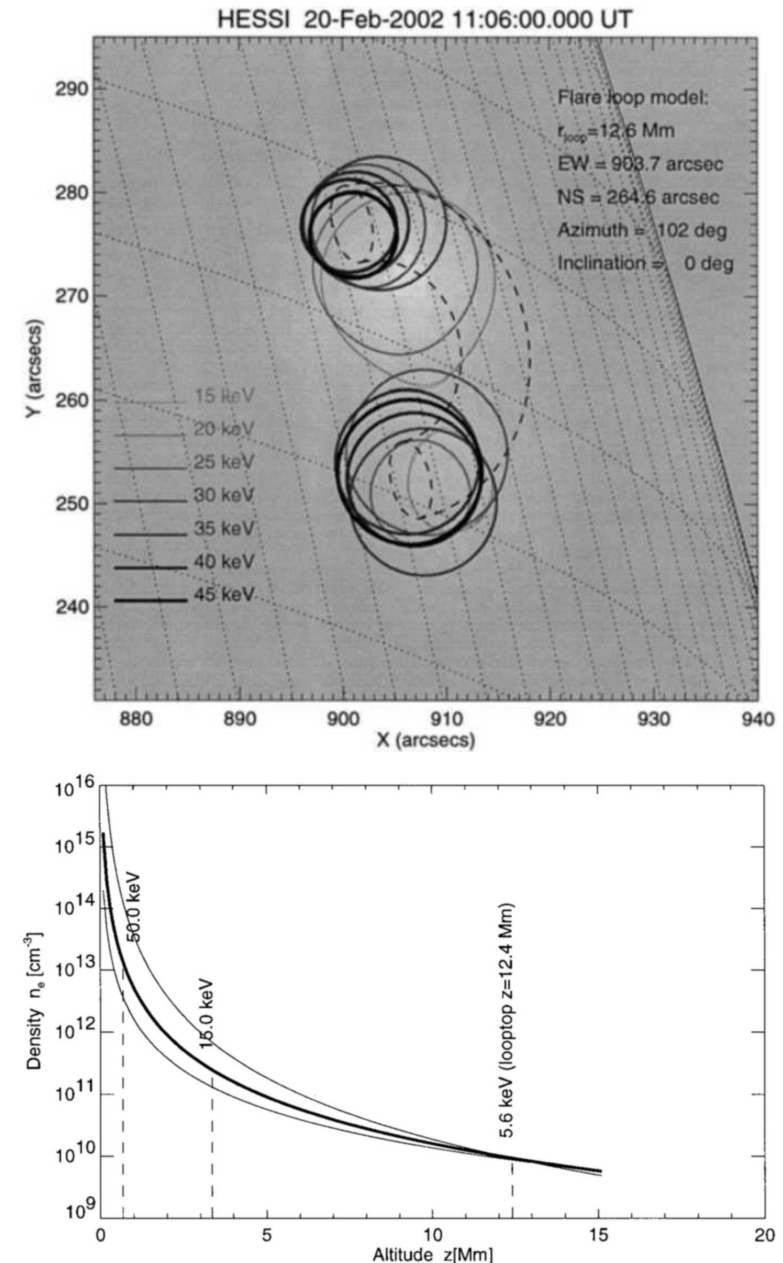
$$N(\epsilon) \sim \frac{\epsilon^2}{2C} \quad N(z) \sim \frac{\epsilon^2(z)}{2C}$$



$$n(z) = -dN/dz$$

- určení pozice centroidu zdroje v ϵ

$$z(\epsilon) \sim \epsilon^{-a} \Rightarrow n(z)$$



Aschwanden et al. (2002)

IMAGING SPECTROSCOPY III

Odvození dE/dz ze spekter hard X-ray

- simulovaná data, Emslie et al. (2001)
- rce kontinuity

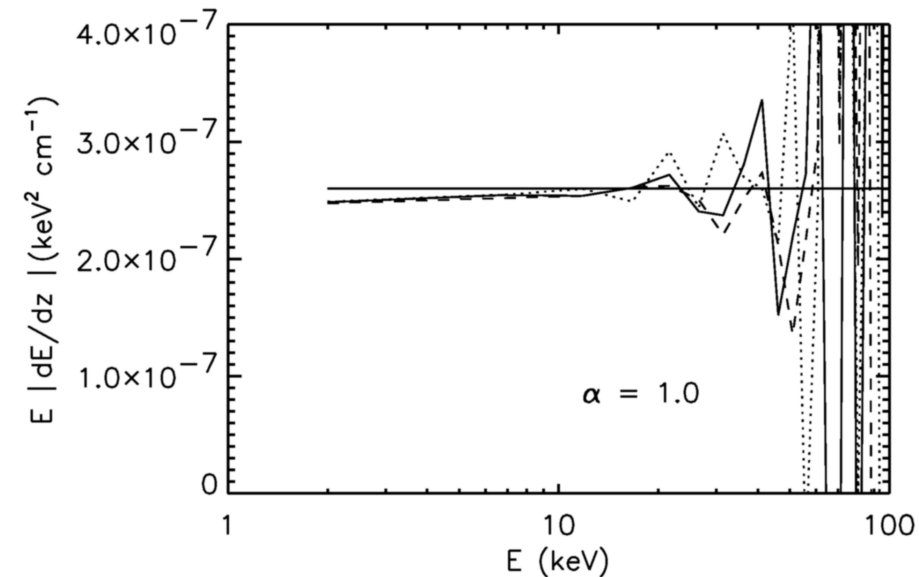
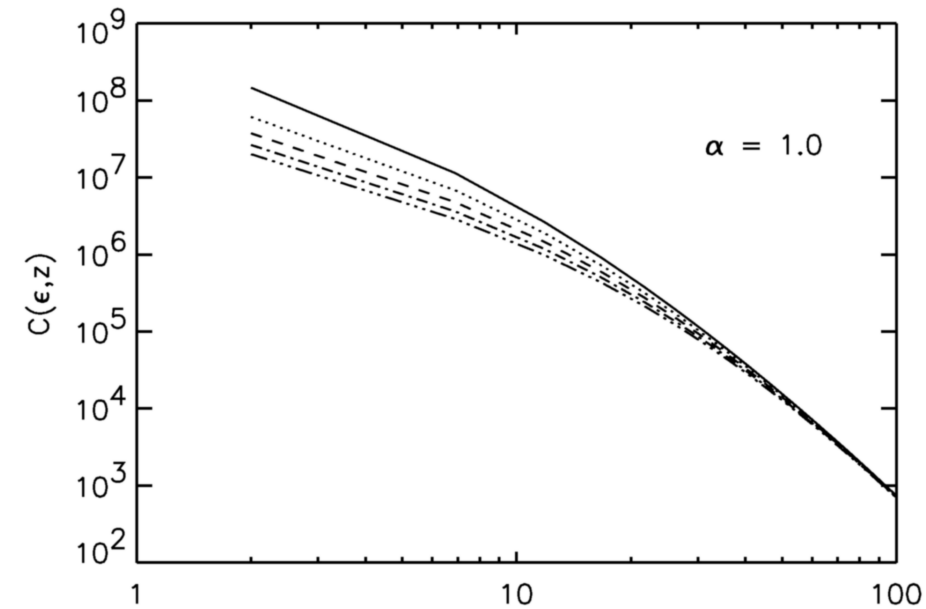
$$\frac{d}{dz} \int_{E_1(z)}^{E_2(z)} F(E, z) dE = 0$$

$$\frac{dE}{dz} = -\frac{1}{F(E, z)} \int \frac{\partial F(E, z)}{\partial z} dE$$

- ztráta energie

$$\frac{dE}{dz} \sim \frac{1}{E^\alpha} \quad 0.5 < \alpha < 1.5$$

- Coulombovské srážky, zcela ionizovaný terč: $\alpha = 1$
- inverze simulovaných fotonových spekter
 - $F(E, z)$, dE/dz



Emslie et al. (2001)

LITERATURA

- Tandberg-Hanssen, E. & Emslie, A. G.: The physics of solar flares, Cambridge University Press, 1988
- Solar Magnetic Phenomena - Proceedings of the 3rd Summerschool and Workshop held at the Solar Observatory Kanzelhöhe, Astronomy and Astrophysics Space Science Library, Vol. 320, 2005
- Letní škola o sluneční fyzice vysokých energií
<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/summerschool/lectures.html>
 - G. Holman: Nonthermal Hard X-Ray Radiation from Solar Flares: Observations and Models
 - A. G. Emslie: Particle Transport
- Aschwanden, M. J. et al.: 2002, Sol. Phys., 210, p. 383
- Brown, J. C. & Emslie, A. G.: 1988, ApJ, 331, p. 554
- Brown, J.C. et al.: 2002, Sol. Phys., 210, p. 373
- Brown, J. C. et al.: 2006, ApJ, 643, p. 523
- Emslie, A. G. et al.: 2001, ApJ, 557, p. 921

LITERATURA

- Emslie, A. G. et al.: 2003, ApJ, 595, p. L107
- Kontar, E. P. et al.: 2004, Sol. Phys., 225, p. 293
- Piana, M. et al.: 2003, ApJ, 595, p. L127