

# Urychlené částice z pohledu sluneční rentgenové emise

## Elektronová spektra II

Jana Kašparová

*Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov*

`kasparov@asu.cas.cz`

# ČÁSTEČNĚ IONIZOVANÝ TLUSTÝ TERČ

- ztráta energie závisí na ionizaci atmosféry  $x(N)$ ,  
Brown (1973)

- srážky s neutrálním vodíkem

$$\sigma_E = \frac{C'}{E^2} \Lambda(x + \lambda)$$

$$\lambda = \ln \Lambda_{eH} / \Lambda \quad \Lambda = \ln \Lambda_{ee} - \ln \Lambda_{eH}$$

- $I_{\text{thick},x}$  není power-law pro  $F_0 = AE_0^{-\delta}$

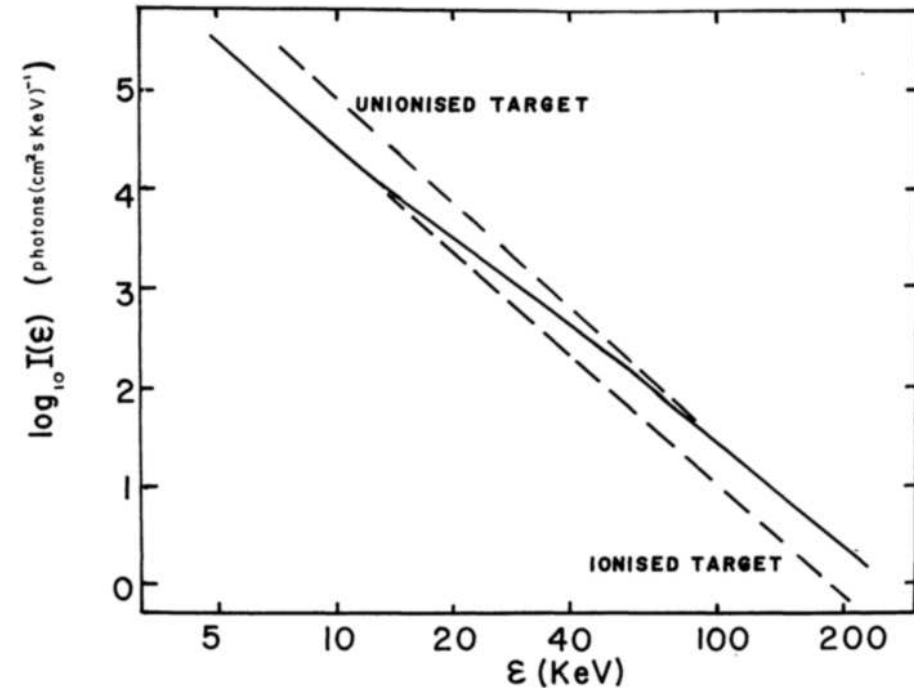
- forward fit

- Kramersův  $\sigma(\epsilon, E)$

- prudká změna ionizace,  $N^*$  přechodová oblast

$$x(M) = \begin{cases} 1 & M < M^* \\ 0 & M > M^* \end{cases} \quad M(N) = \int_0^N (\lambda + x(N')) dN' \quad M^* = (\lambda + 1)N^*$$

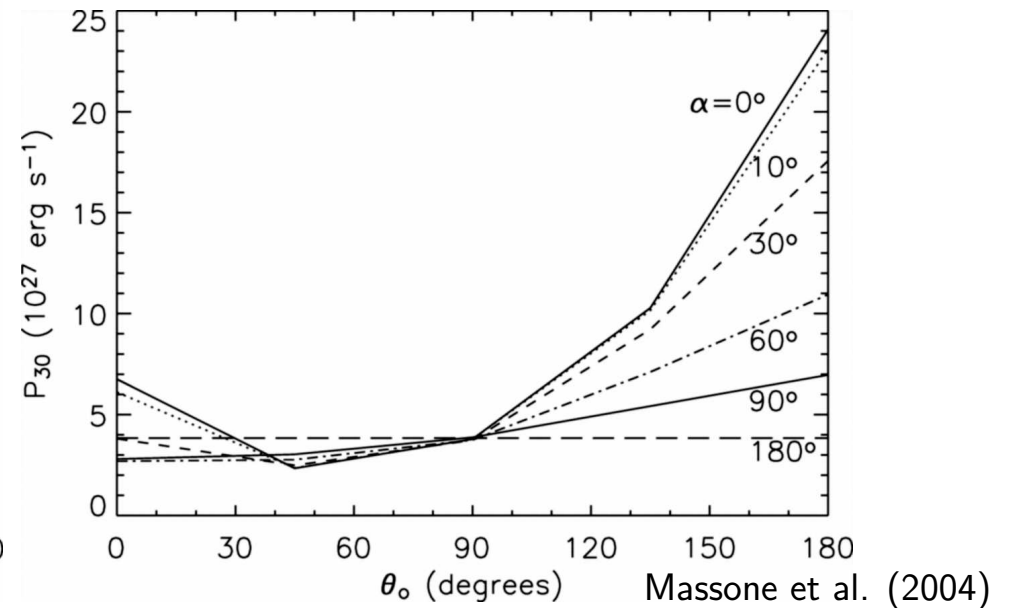
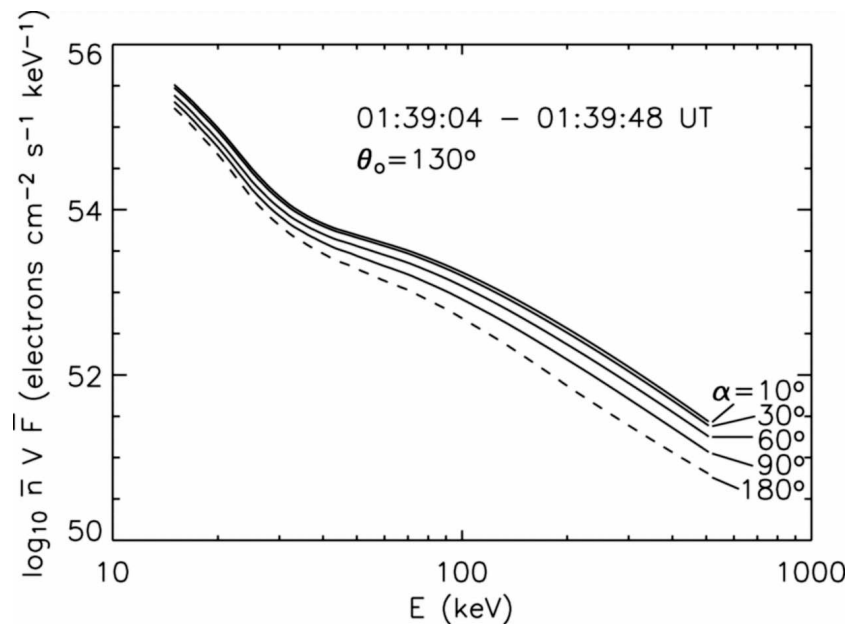
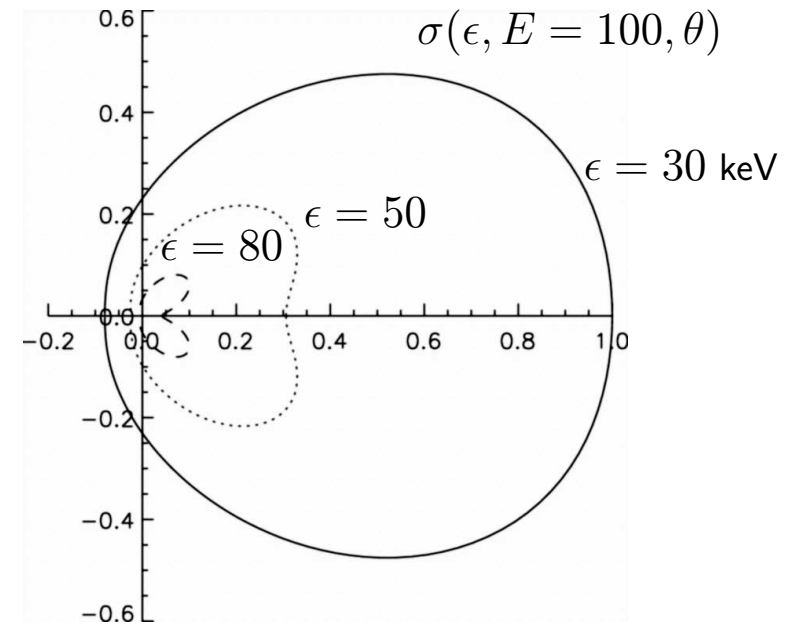
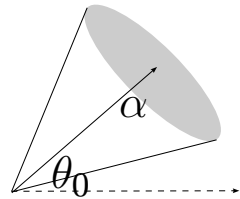
- interpretace odchylky od power-law  $I$  (není dána tvarem  $F_0$ )
- odvození  $N^*$  (Kontar et al. , 2002, 2003)



Brown (1973)

# ANISOTROPIE HARD X-RAY EMISE

- $\sigma(\epsilon, E, \theta)$
- anisotropní emise z modelů šíření el. svazků
  - závislost na směru k pozorovateli
  - spektrum elektronů má úhlovou závislost  $\bar{F}(E, \Omega)$  (např. díky srážkám)

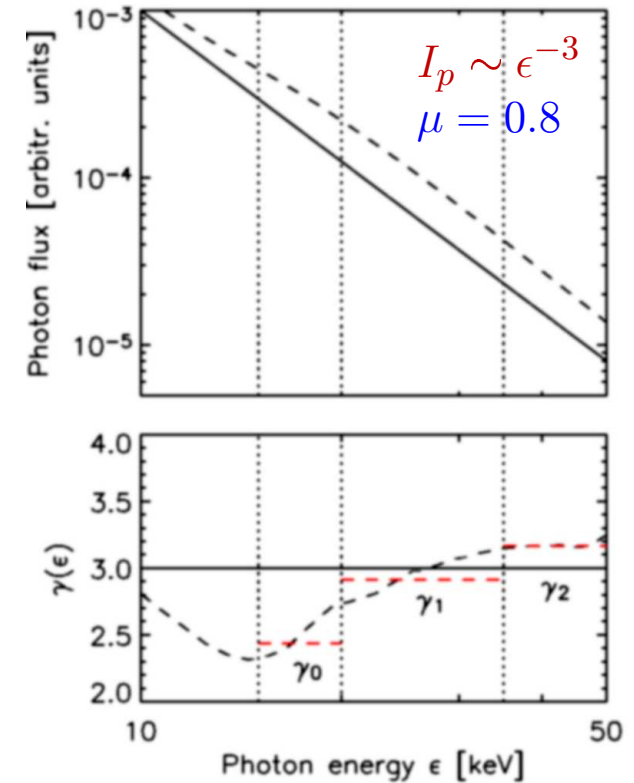


Massone et al. (2004)

# FOTOSFÉRICKÉ ALBEDO

- fotony rozptýlené ve fotosféře do směru pozorovatele (Bai & Ramaty 1978) (10-100 keV)
- $I_a$  závisí na
  - spektru primární hard X-ray emise  $I_{\text{down}}$  (větší pro plošší  $I_{\text{down}}$ )
  - pozici zdroje na slunečním disku -  $\mu$  (větší pro erupce ve středu disku  $\mu = \cos \theta$ )
  - anisotropii primární emise (větší pro emisi kolimovanou k fotosféře)
- modifikace pozorované emise  $I(\epsilon, \mu)$

$$I(\epsilon, \mu) = I_{\text{up}}(\epsilon, \mu) + I_a(\epsilon, \mu) \quad I_a(\epsilon, \mu) = G(\epsilon, \epsilon', \mu) I_{\text{down}}(\epsilon')$$

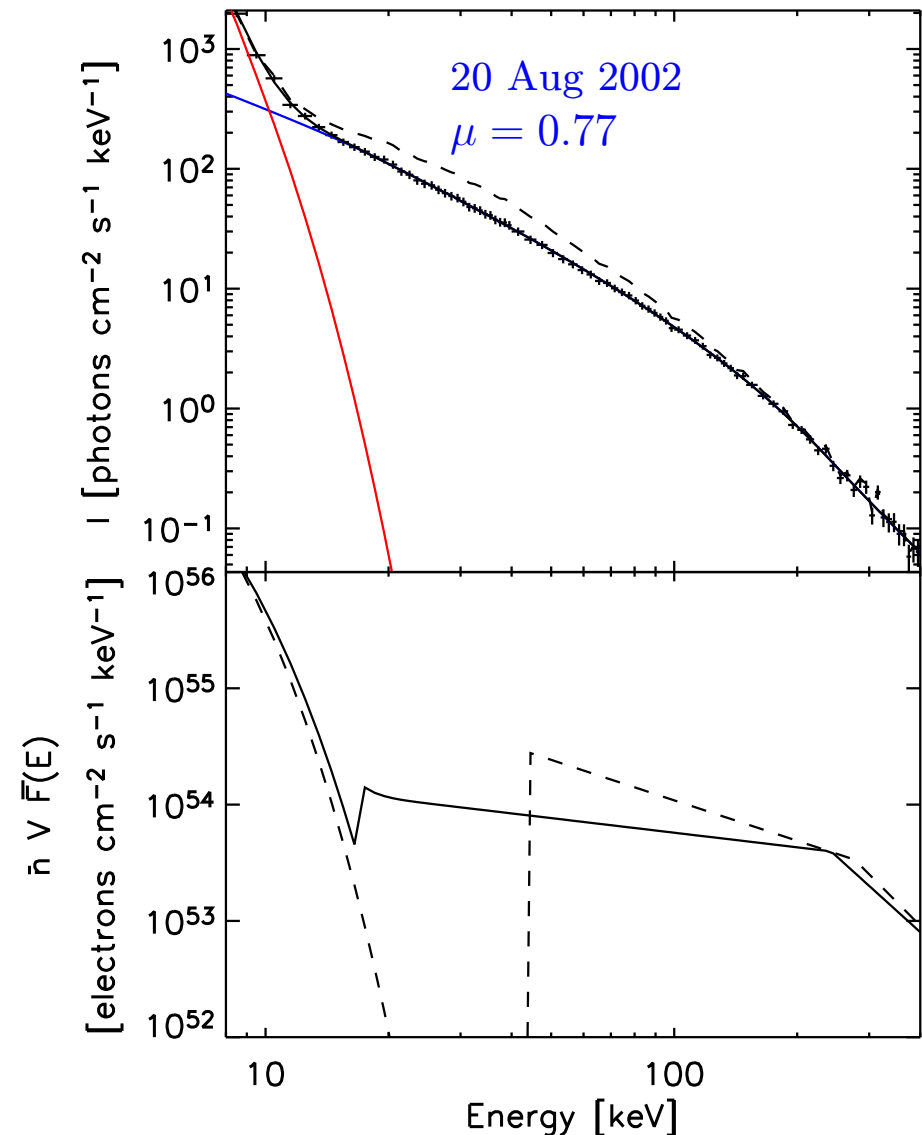


# ALBEDO A $\bar{F}(E)$

- albedo mění tvar  $\bar{F}(E)$
- “vytvoří” spektrální tvary, které nepřisluší  $I_{\text{up}}$ 
  - “dips” nebo “low-energy cutoffs”
  - nekonzistentní s modelem tlustého terče

$$F_0(E_0) \geq 0 \Rightarrow \delta(E) \geq -1 \quad \forall E > 0$$

$$\delta(E) = -\frac{d \ln \bar{F}(E)}{d \ln E}$$



Kašparová et al. 2005

Oprava na isotropické albedo odstraní dip v  $\bar{F}(E)$

# ALBEDO A ANISOTROPIE

- využití efektu albeda jako zrcadla
- odhad anisotropie  $\alpha_\nu = I_{\text{down}}/I_{\text{up}}$  nebo  $\alpha_E = F_{\text{down}}/F_{\text{up}}$

## Statistické metody

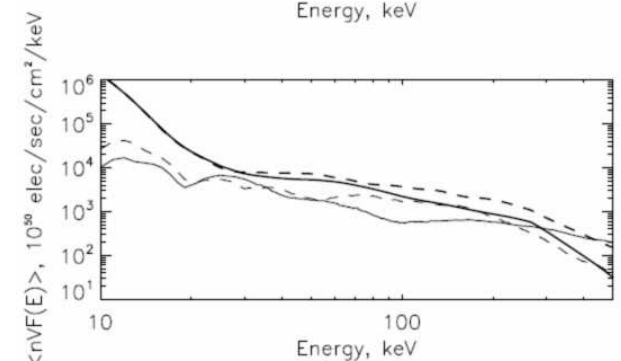
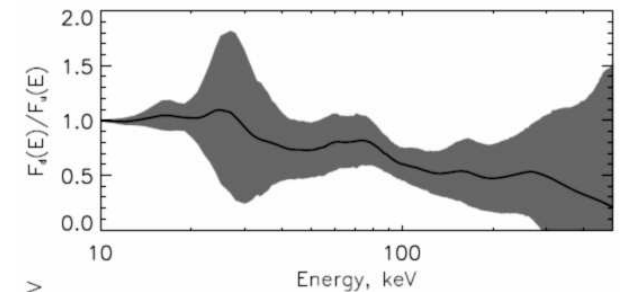
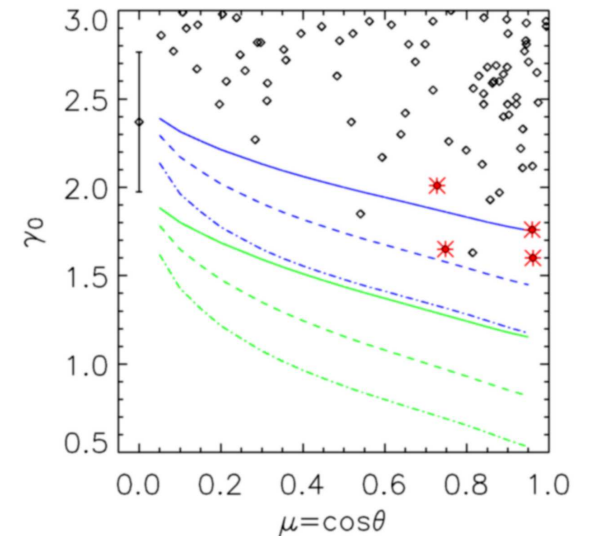
- závislost  $\gamma(\epsilon)$  na  $\mu$  díky albedu a/nebo anisotropii elektronů: **centre-to-limb variation**
- srovnání distribucí  $\gamma(\epsilon)$  pro různé  $\mu$   
 $0.2 < \alpha_\nu < 5$  v energiích 15 - 20 keV

## Inverze spekter

- $F_{\text{down}}, F_{\text{up}}$  tvoří  $I(\epsilon)$

$$I = \left( Q^F + G(\mu)Q^B \quad Q^B + G(\mu)Q^F \right) \begin{pmatrix} \bar{F}_{\text{up}} \\ \bar{F}_{\text{down}} \end{pmatrix}$$

- $\alpha_E \approx 1 \Rightarrow$  nekonsistentní se srážkovým modelem tlustého terče



Kontar & Brown (2006)

# PROCESY URYCHLENÍ ELEKTRONŮ

---

- motivace pro studium X-ray
  - odhad parametrů urychlovacích procesů (počet částic, spektrum,..)
- podobné procesy i v jiných astrofyzikálních objektech
  - magnetosféra Země (urychlení el. polem), jádra aktivních galaxií, akreční disky

## Hlavní mechanismy pro sluneční erupce

- urychlení elektrickým polem
  - např. elektrická pole generována při rekonexi mag. pole
- stochastické urychlení (stochastic acceleration)
- urychlení rázovými vlnami (shock acceleration)
  - first-order Fermi acceleration
  - second-order Fermi acceleration  $\approx$  stochastic acceleration

# URYCHLENÍ ELEKTRICKÝM POLEM

---

- Dreicerovo pole  $E_D$ : urychlení (runaway) termálních elektronů  $v_{\text{therm}}$

$$v_{\text{crit}} = v_{\text{therm}} (E_D/E)^{1/2} \quad E_D \approx n/T$$

**Sub - Dreicer pole:**  $E < E_D$ , Holman (1985)

- $E/E_D \sim 0.02 - 0.1$ , prostorová škála  $L \sim 10^9$  cm
- energie elektronů  $\sim 100$  keV
- souhlas s X-ray spektry (fit termální + netermální složky) a rádiovými spektry
- model neřeší vznik pole ani jeho stabilitu na  $L \sim$  rozměr erupční smyčky

**Super - Dreicer pole:**  $E \gg E_D$ , Litvinenko (1996)

- prostorová škála  $l \sim 10^4$  cm
- urychlení velkého počtu částic

**Betatron**

- časově závislé  $E(t)$  generované  $B(t)$
- sekundární urychlovací proces
- možné vysvětlení hard X-ray zdroj ve vrcholu erupční smyčky (Karlický & Bárta, 2006)

## Stochasticky

- interakce částic s vlnami
  - urychlení magnetoakustickými vlnami
  - power-law spektra urychlených elektronů
  - možné vysvětlení korelace hard X-ray toku a spektrálního indexu (Grigis & Benz, 2006)

## Rázovými vlnami

- observačně jako rádiová vzplanutí typu II
- Shock-drift acceleration
  - urychlení při jediném průchodu rázovou vlnou
  - $\langle \Delta v/v \rangle \sim U/v \Rightarrow$  first order Fermi acceleration,  $U$  rychlost vlny
- Diffusive-shock acceleration
  - několik průchodů rázovou vlnou
  - $\langle \Delta v/v \rangle \sim (U/v)^2 \Rightarrow$  second order Fermi acceleration
- aplikace na “outflow regions of reconnection sites”

# BUDOUCNOST SLUNEČNÍ HARD X-RAY FYZIKY

- rychle se rozvíjející obor díky RHESSI
- odpovědi na otázky
  - existuje dominantní mechanismus urychlování?
  - kde jsou částice urychlovány (pouze v koroně ?)?
  - jaké je úhlové rozdělení urychlených částic?
  - jaká je nejnižší/nejvyšší energie částic v erupci?

## Nové přístroje

- Solar Orbiter, projekt ESA, přiblížení na 0.22 AU, start ~ 2012

- STIX: 3 - 150 keV, spektr. rozl. 2 - 4 keV, prostorové rozl. 2.3"
- Astron. ústav v Ondřejově členem týmu pro STIX

- Solar Sentinels, projekt NASA, program Living with a Star

- start ~ 2014
- 4 stejné družice v 0.25 - 0.75 AU
- 1 družice v 1 AU
- 1 družice na odvrácené straně Slunce



# KO KO KONEC

---



# LITERATURA

---

- Aschwanden, M. J.: Physics of the Solar Corona, Praxis Publishing, 2006
- 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
- Bai, T. & Ramaty, R.: 1978, ApJ, 219, p. 705
- Brown, J. C.: 1973, Sol. Phys., 28, p. 151
- Grigis, P. C. & Benz, A. O.: 2006, A&A, 458, p. 641
- Holman, G. D.: 1985, ApJ, 293, p. 584

## LITERATURA

---

- Karlický, M. & Bárta, M.: 2006, 647, p. 1472
- Kašparová et al.: 2005, Sol. Phys., 232, p. 63
- Kontar, E. P. et al.: 2002, Sol. Phys., 210, p. 419
- Kontar, E. P. et al.: 2003, ApJ, 595, p. L123
- Kontar, E. P. & Brown, J. C.: 2006, arXiv:astro-ph/0611170  
<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0611170>
- Litvinenko, Y. E.: 1996, ApJ, 462, p. 997
- Massone, A. M. et al.: 2004, ApJ, 613, p. 1233