

# Urychlené částice z pohledu sluneční rentgenové emise

Jana Kašparová

*Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov*

`kasparov@asu.cas.cz`

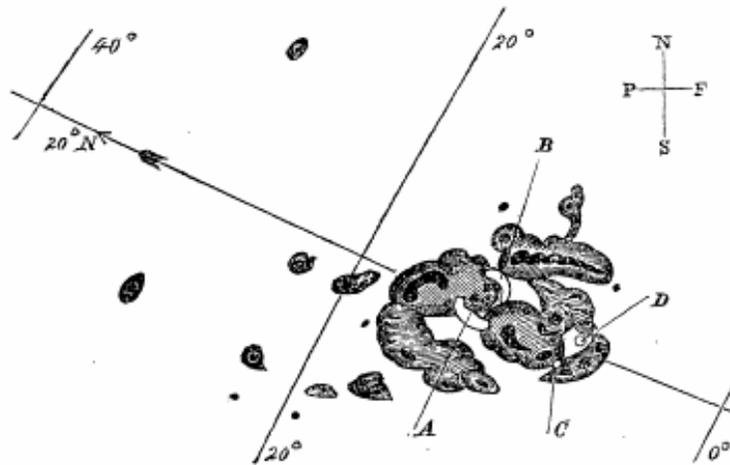
- sluneční erupce
  - stručný přehled pozorování, modelů, družicových dat
  - role svazků urychlených částic, jejich detekce
  - parametry slunečního plasmatu
- elektronové svazky I
  - procesy vzniku X-ray emise (termální/netermální)
  - modely tlustého/tenkého terče (thick/thin target)
  - aplikace na spektra z RHESSI, fitování zadanými funkcemi (forward fitting)
- elektronové svazky II
  - problém inverze fotonových spekter (regularised inversion), data z RHESSI
  - vliv částečné ionizované atmosféry
  - anisotropie fotonové emise, elektronů, albedo, imaging spectroscopy
  - modely urychlení elektronů versus pozorování
  - horké novinky z RHESSI, nové přístroje

# SLUNEČNÍ ERUPCE - SOLAR FLARES

---

## Trocha historie

- objevení erupce: 1. 9. 1859 ( white light flare)
  - nezávisle pozorována R.C. Carringtonem a R. Hodgsonem
  - magnetická bouře následující den 2. 9.
  - spekulace o spojitosti mezi erupcí a mag. bouří v Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 1860

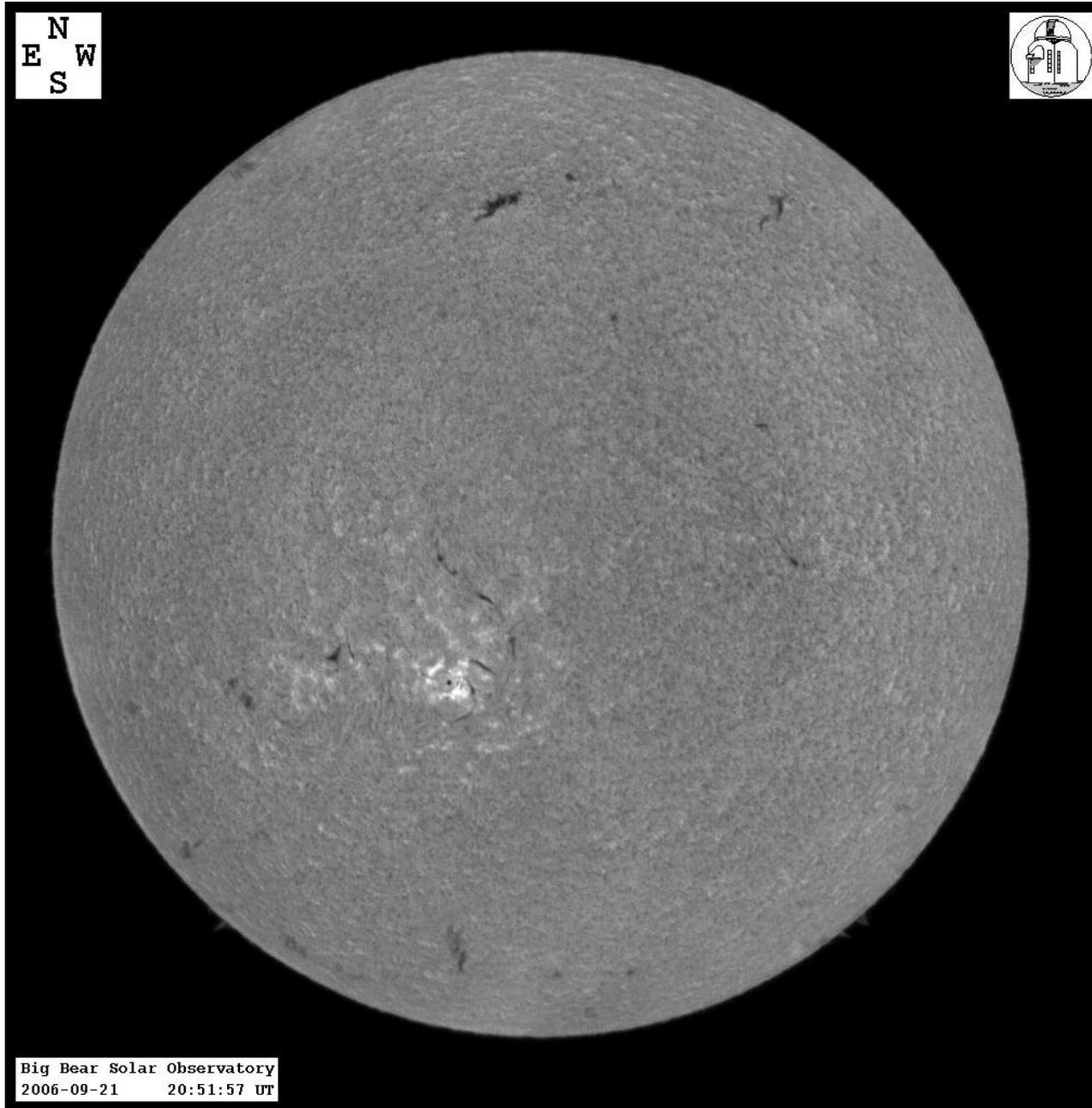


Carrington, MNRAS 1859, 20, p. 13

- dřívější pozorování zřejmě v Číně (9. 12. 1638):
  - “na Slunci byla černá skvrna a černé a modré a bílé výpary”

# SLUNCE v H $\alpha$ 6563 Å

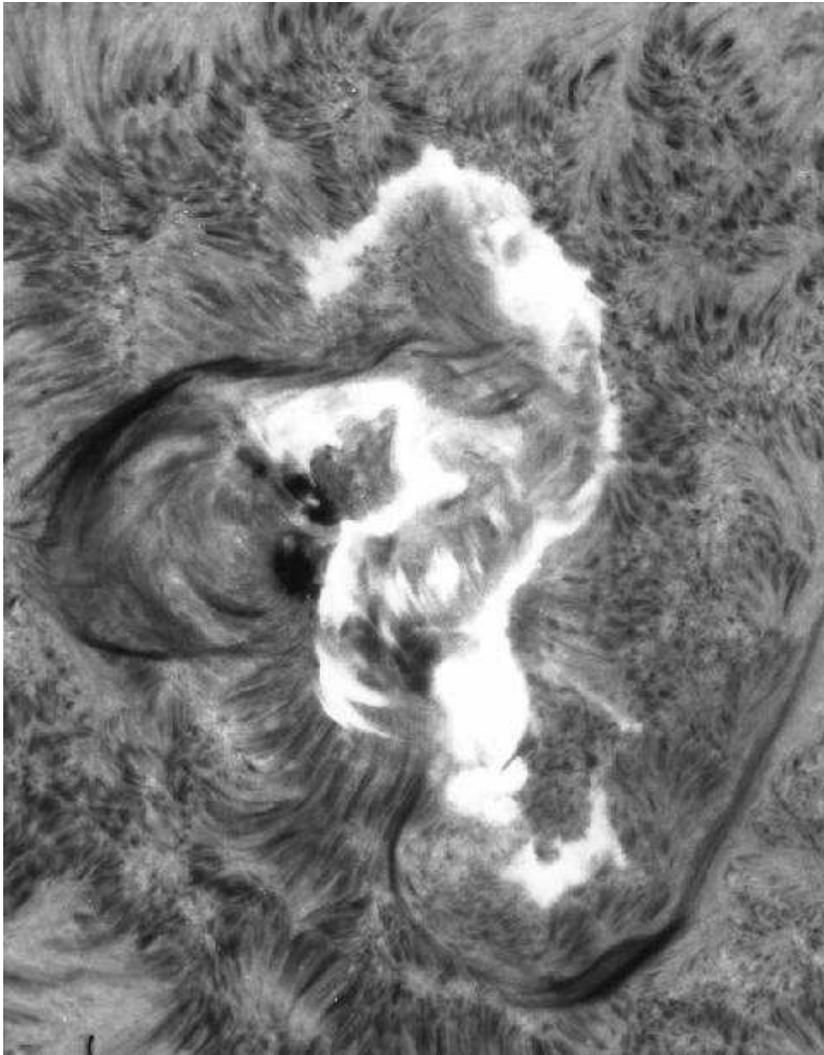
---



Big Bear Solar Observatory

# ERUPCE V $H\alpha$ 6563 Å

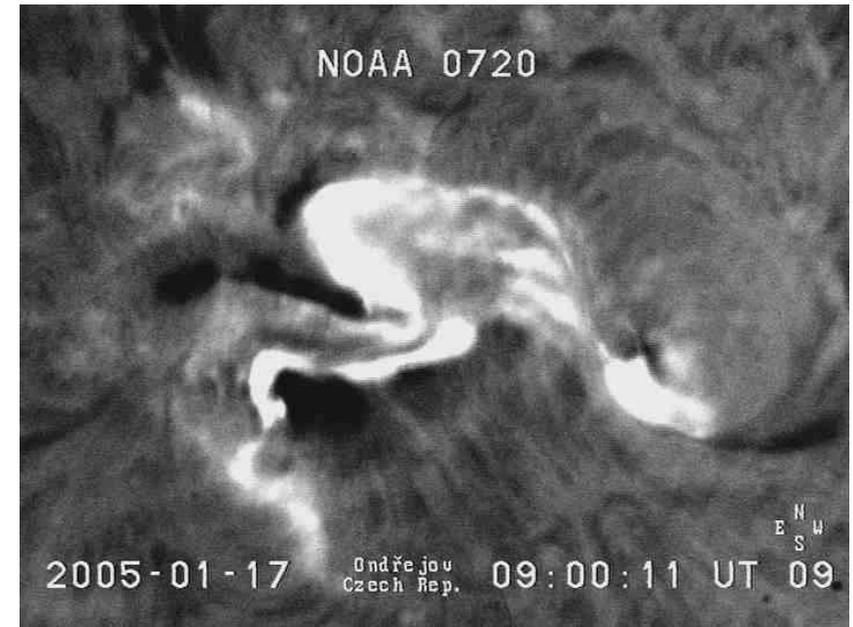
---



“mořský koník” 7. 8. 1972  
Big Bear Solar Observatory  
<http://www.bbso.njit.edu/>

## $H\alpha$ klasifikace

- plocha: S, 1 – 4
- relativní intenzita: f, n, b



Sluneční patrola Ondřejov, Asú AV ČR  
<http://www.asu.cas.cz/%7Esunwatch/index.html>

## Světelné křivky (Light curves)

- **Geostationary Operational Environmental Satellites: GOES**

- 0.5 – 4 Å (3 – 25 keV)

- 1 – 8 Å (1.6 – 12 keV)

- <http://www.sec.noaa.gov/>

- GOES klasifikace

- A, B, C, M, X

- parametry plasmatu z GOES

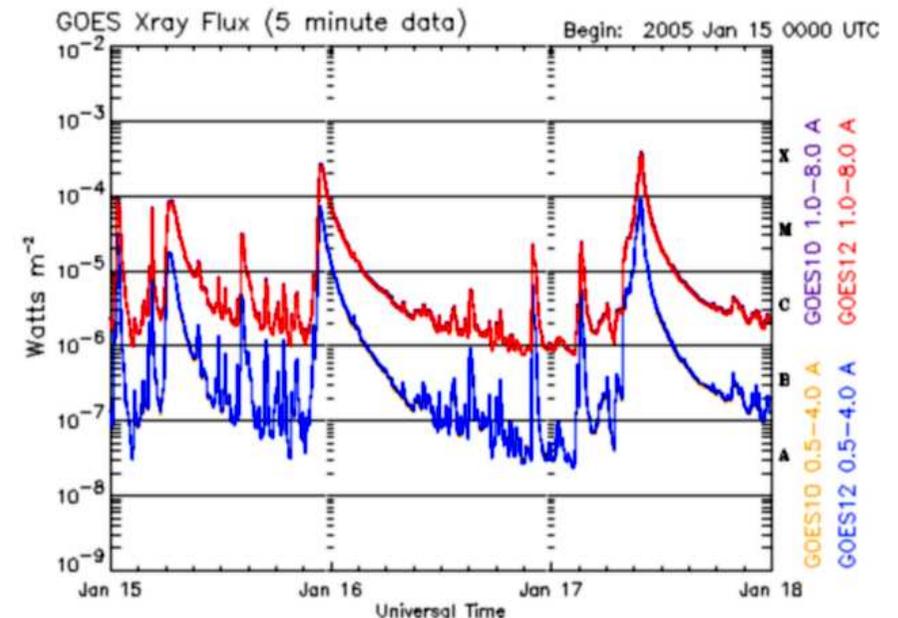
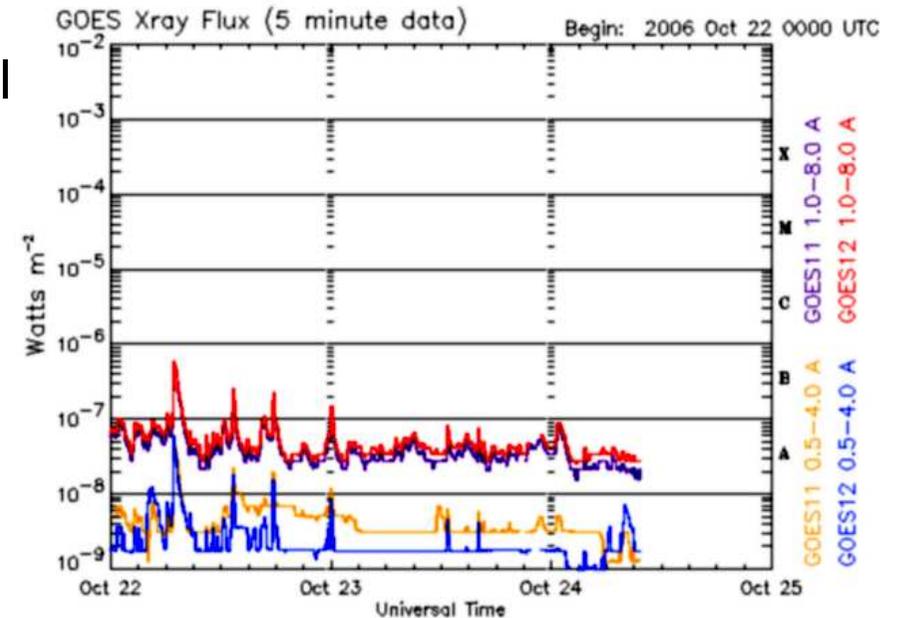
- předpoklad isothermální plasmy, abundance, zářivých procesů

- míra emise  $EM$  (emission measure)

- teplota  $T$

- termální energie (při znalosti objemu)

$$3kT(EM \times V)^{1/2}$$



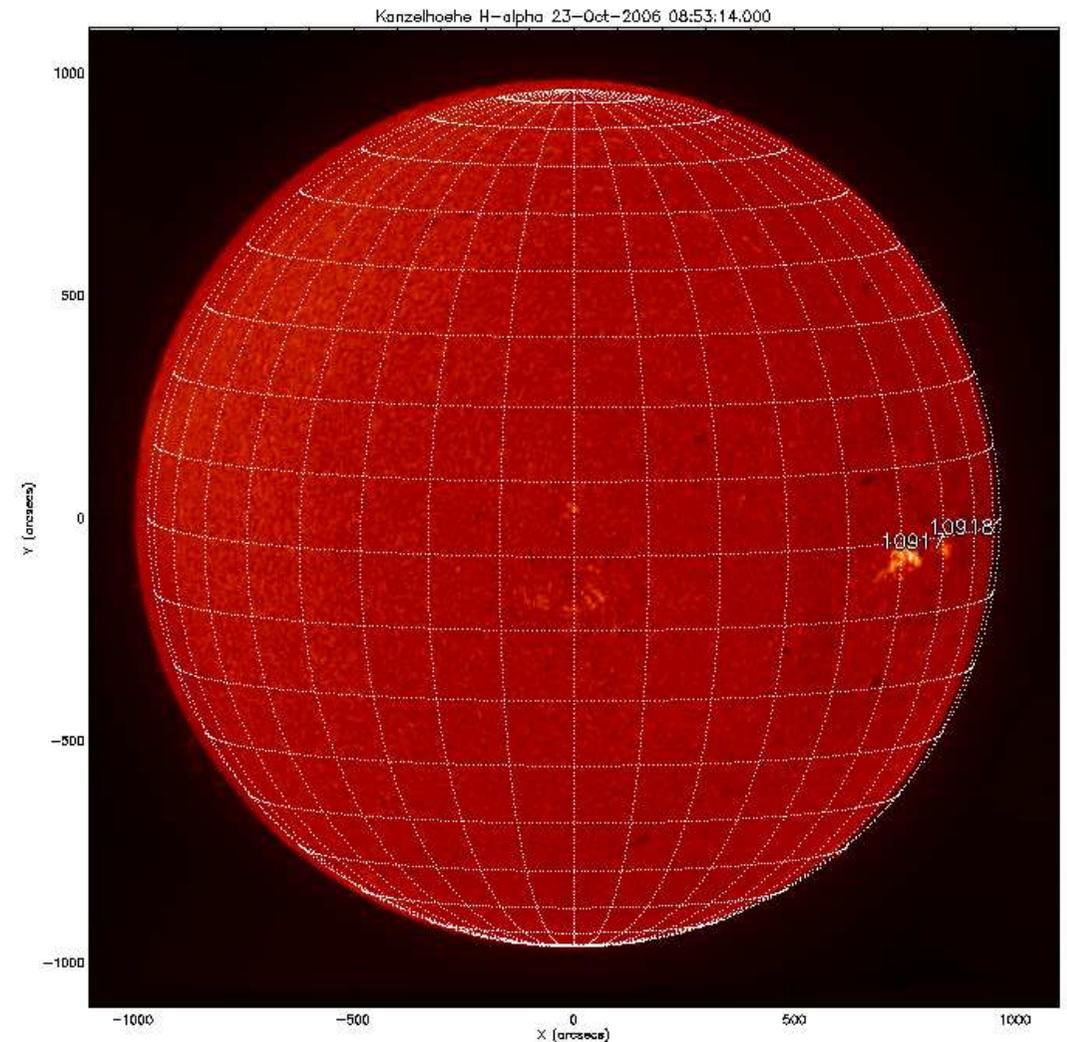
# ERUPCE - PROJEV SLUNEČNÍ AKTIVITY

- erupce se vyskytují v aktivních oblastech
- předpovědi aktivity na základě klasifikace magnetického pole aktivních oblastí (např. McIntosh, Mt. Wilson)

## Předpověď (24. 10. 2006)

Activity level – VERY LOW – no flares in past two days. Region most likely to flare: NOAA 10917 – Probabilities: X(2%), M(11%), C(38%)

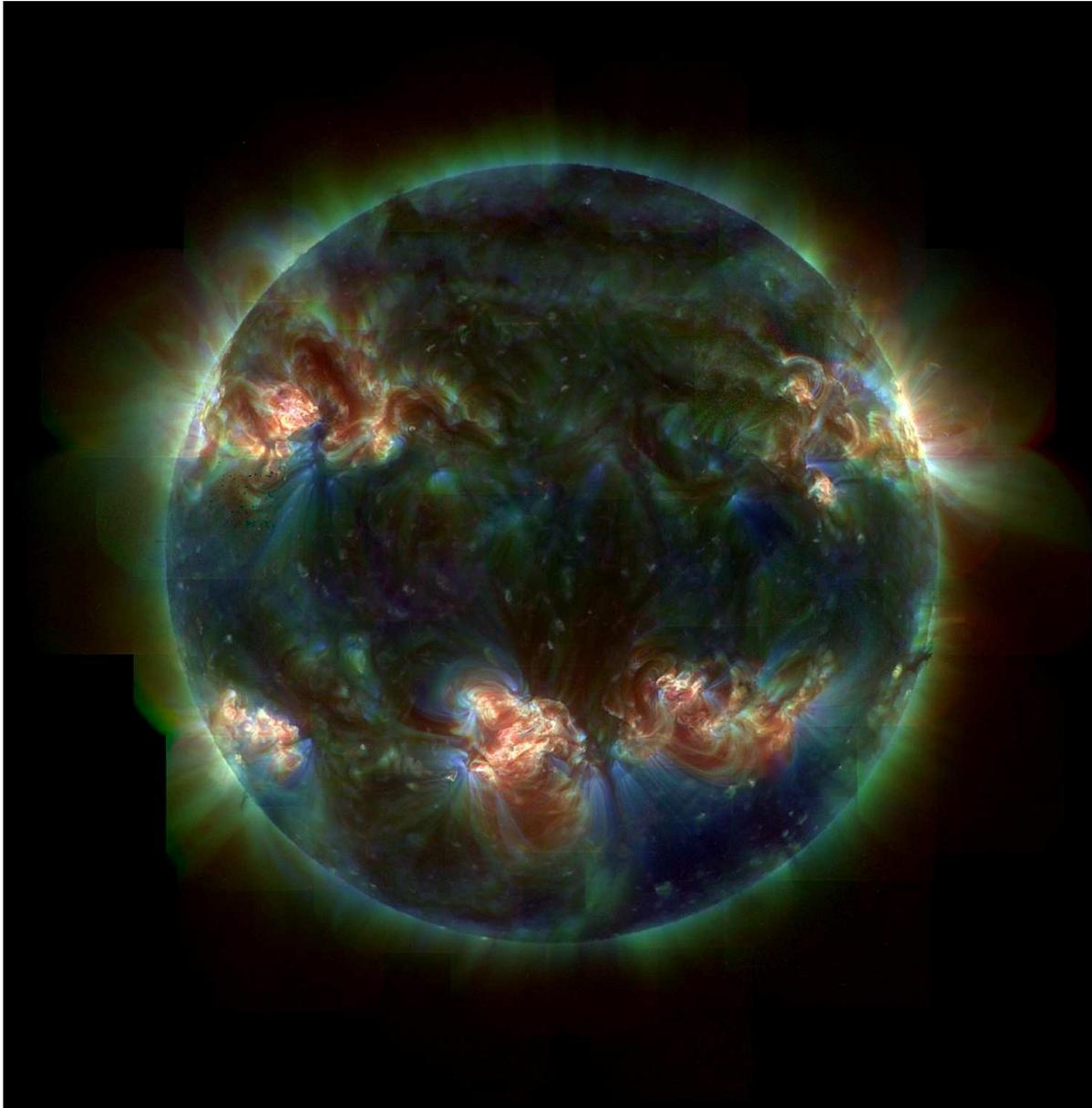
<http://www.solarmonitor.org/>



# SLUNCE V UV A EUV

---

TRACE - **T**ransition **R**egion and **C**oronal **E**xplorer, 29. 6. 1999



<http://trace.lmsal.com/>

171 Å ~ 1 MK, Fe IX

195 Å ~ 1.5 MK, Fe XII

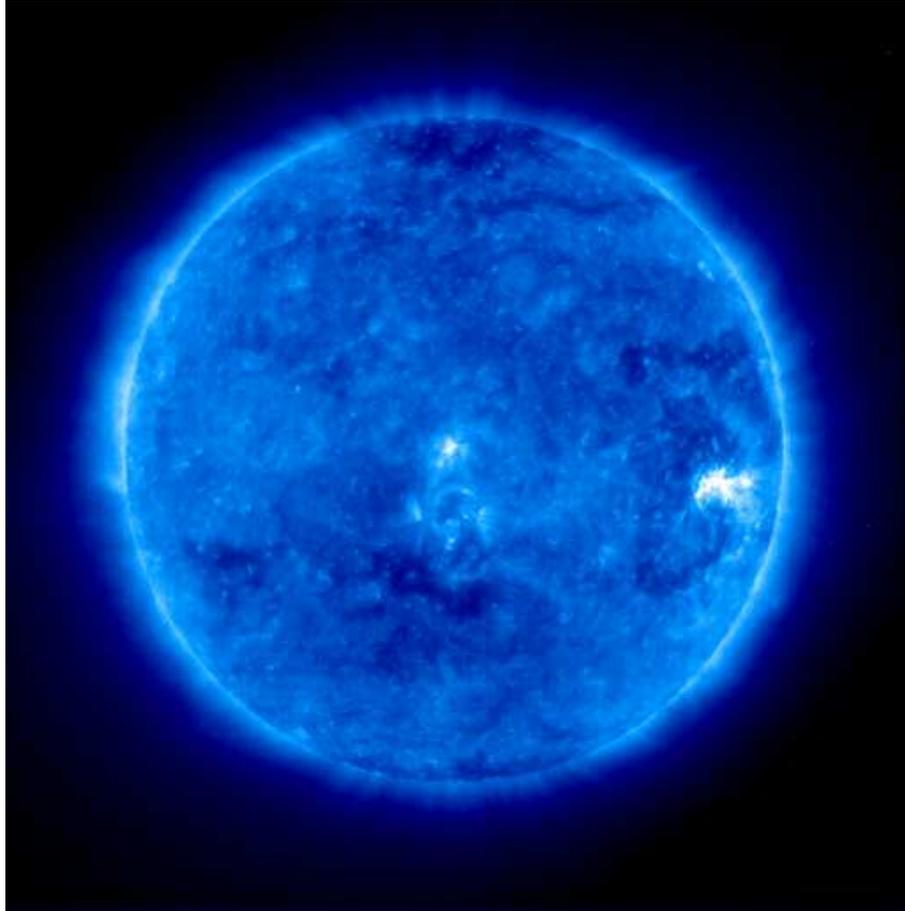
284 Å ~ 2 MK, Fe XV

# SLUNCE V UV A EUV

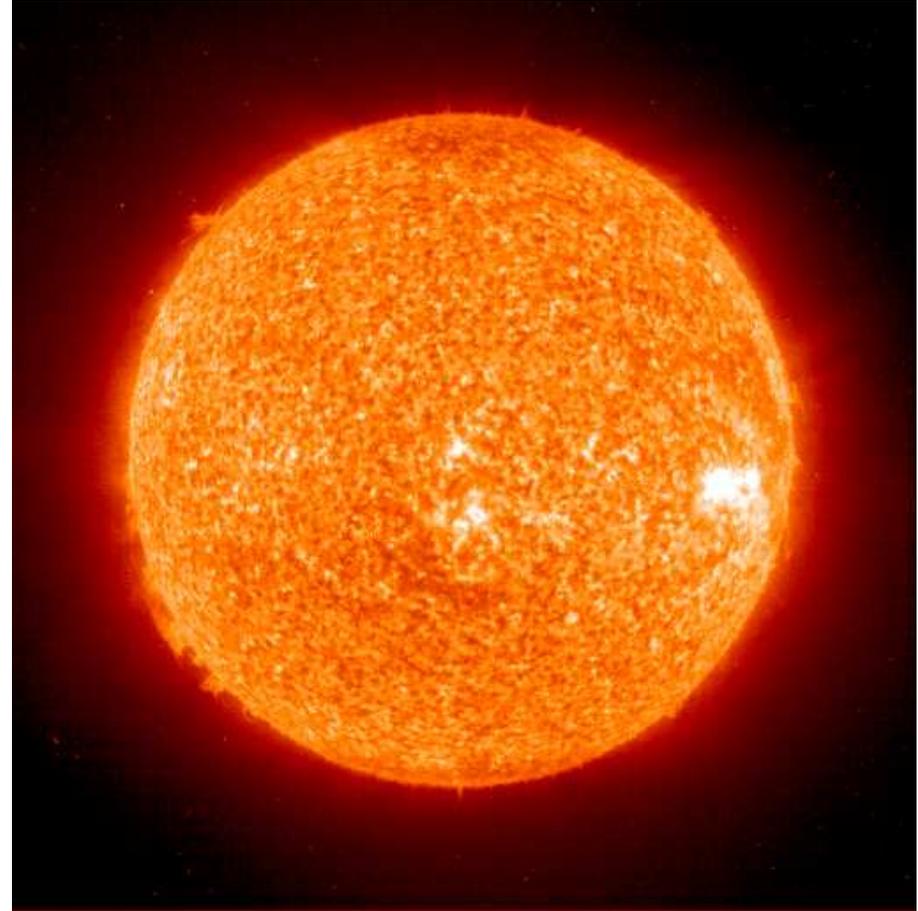
---

SOHO/EIT SOHO **E**xtrême Ultraviolet **I**maging **T**elescope, 24.10. 2006

<http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/EIT.html>



171 Å korona, přechodová oblast

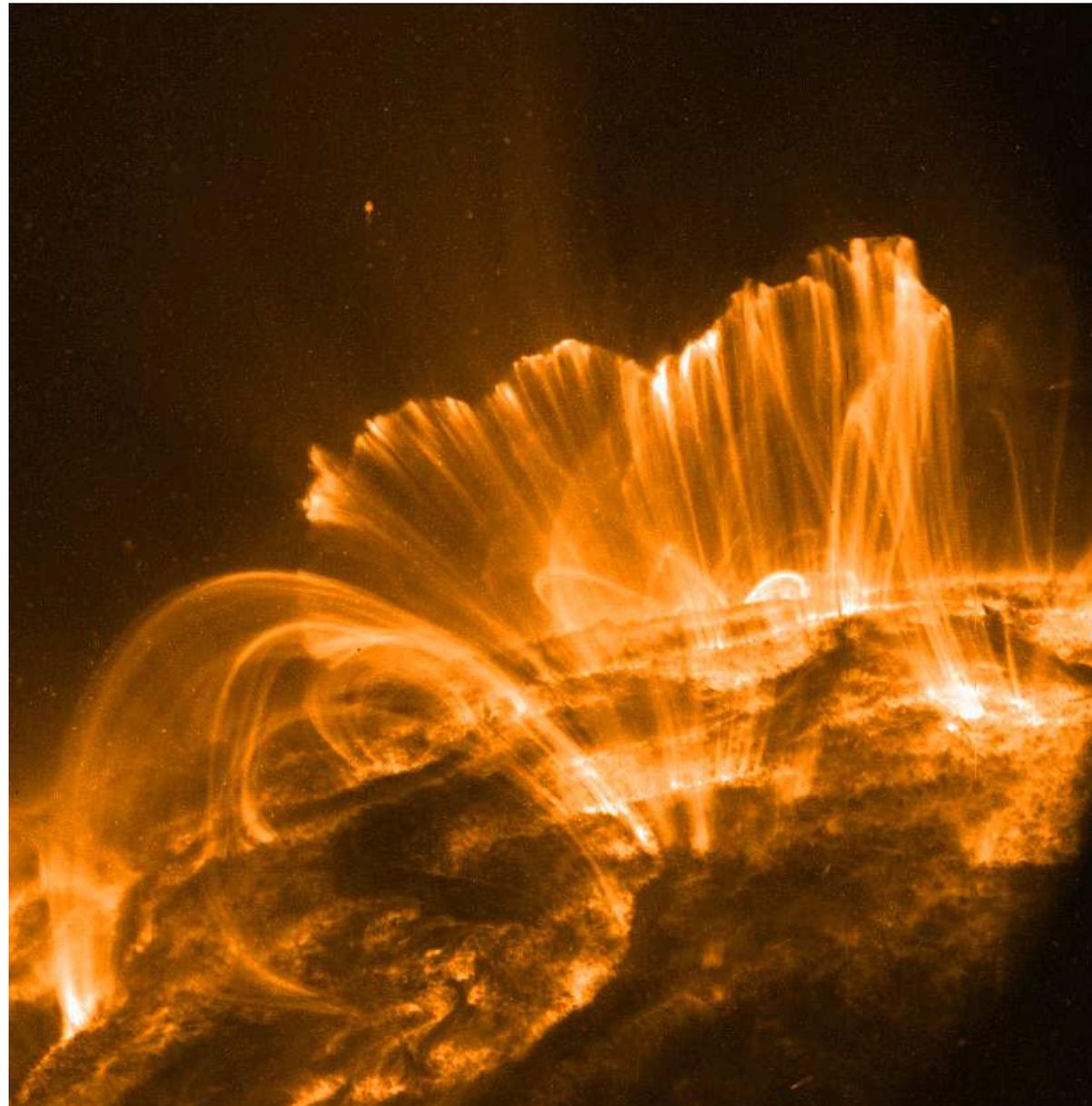


304 Å He II/Si XI  $\sim 8 \times 10^4$  K chromosféra

# (P)ERUPČNÍ SMYČKY - (POST)FLARE LOOPS

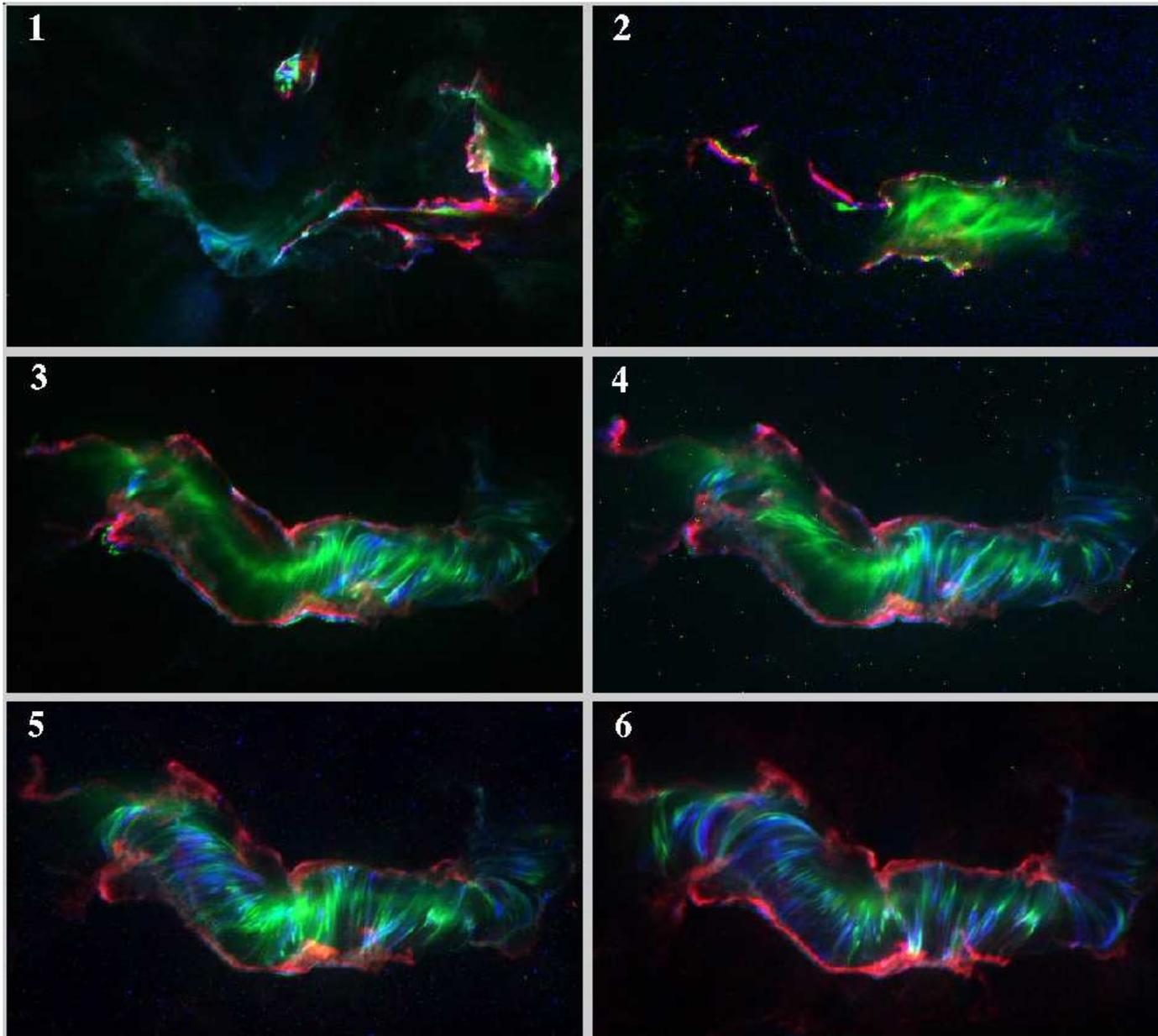
---

TRACE 171 Å



# (P)ERUPČNÍ SMYČKY - (P)OSTFLARE LOOPS

“Bastille day flare”, 14. 7. 2000, X 5.7, TRACE



UV continuum

171 Å ~ 1 MK

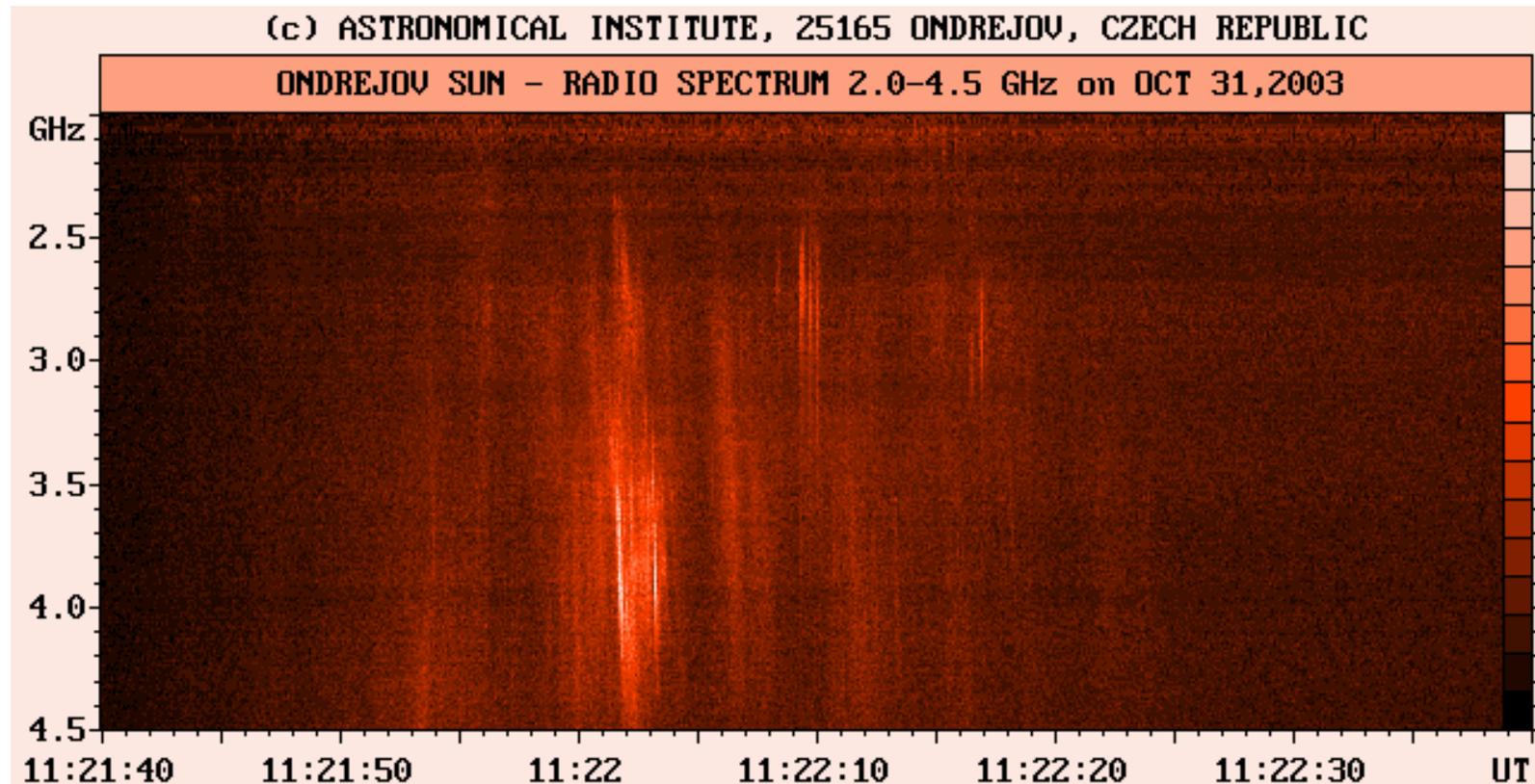
195 Å ~ 1.5 MK

movies...

# RÁDIOVÁ EMISE

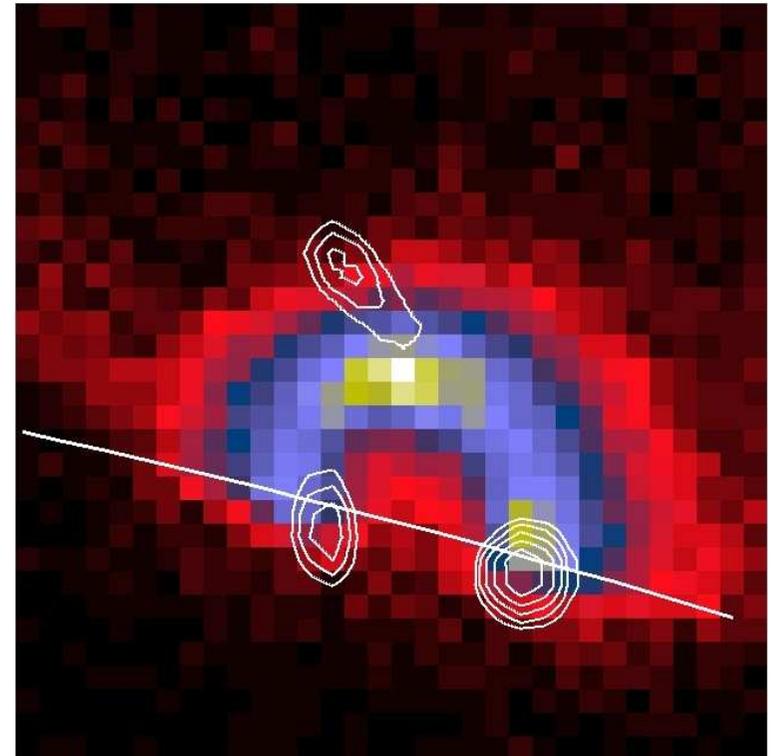
---

- několik emisních mechanismů, “zoo” typů
  - např. gyrosynchrotronní záření, vzplanutí typu III
- typy dat:
  - dynamická spektra, obrazová informace na dané frekvenci



<http://www.asu.cas.cz/%7Eradio/>

- emisní mechanismus:
  - bremsstrahlung (volno–volný přechod)
- Yohkoh (sluneční paprsek)
  - 31. 8. 1991 - 14. 12. 2001
  - SXT, HXT
  - <http://www.lmsal.com/SXT/homepage.html>
- “Masuda flare”, 13. 1. 1992



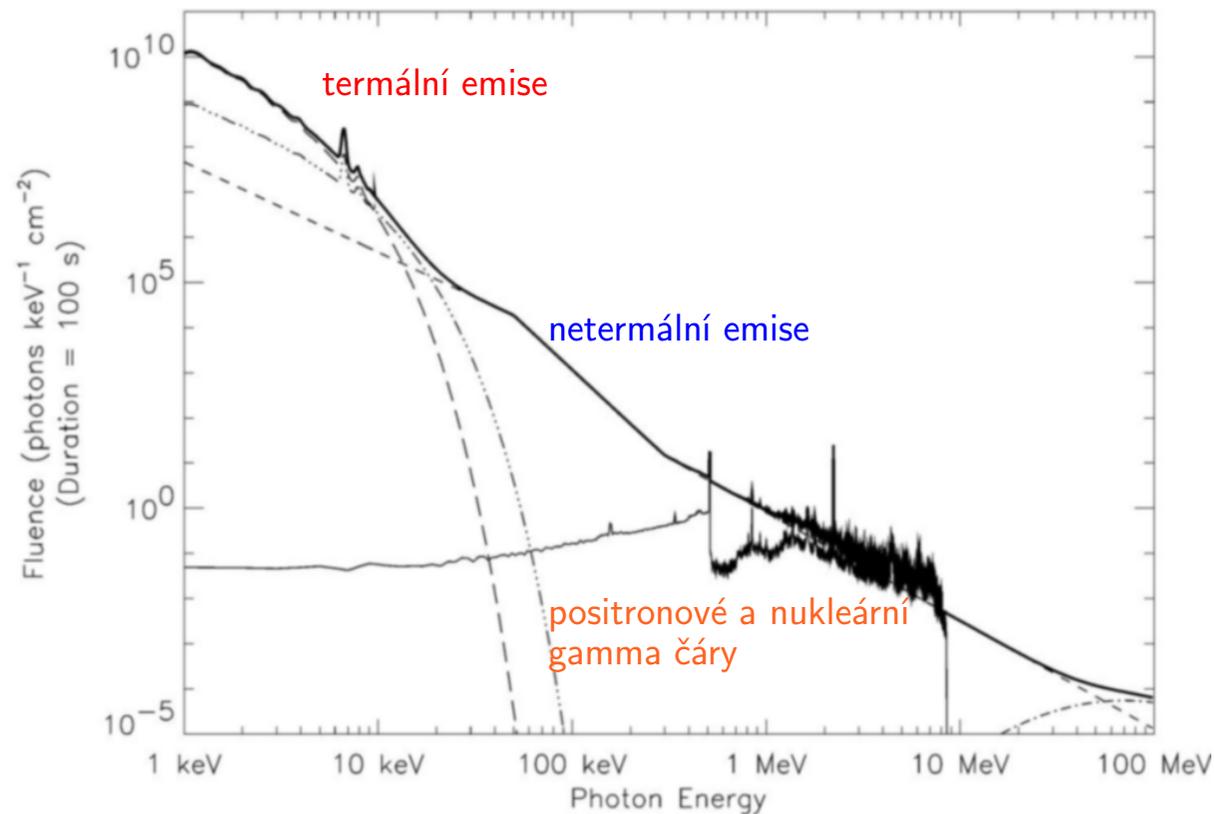
kontury 33 – 53 keV

# ERUPCE V HARD X-RAY - SPEKTRA

## RHESSI

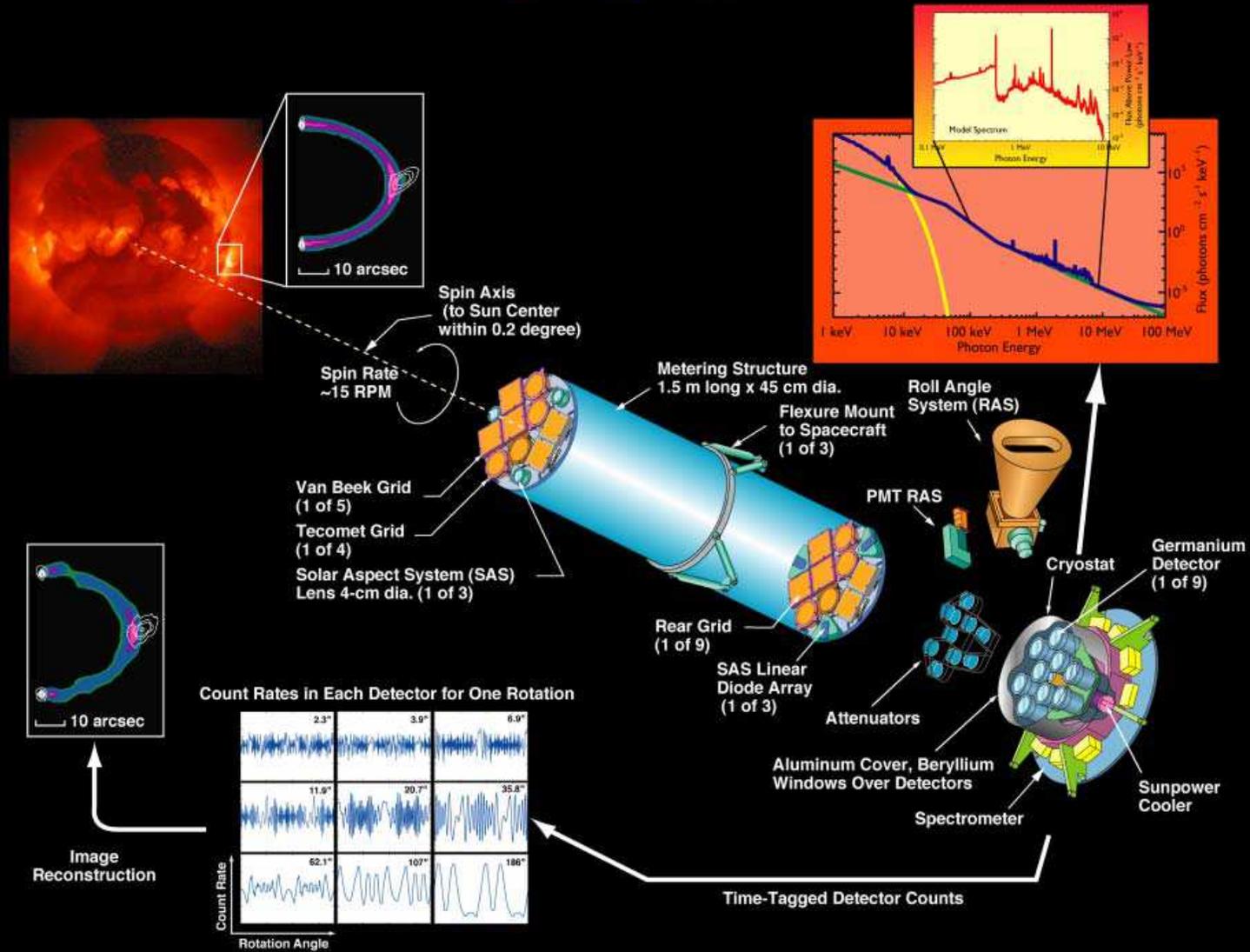
<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessi/>

- **R**euvan **R**amaty **H**igh **E**nergy **S**olar **S**pectroscopic **I**mager
- vypuštěna 5. 2. 2002
- vynikající spektrální rozlišení  $\sim 1$  keV
- rozsah 3 keV – 20 MeV, prostorové rozlišení  $\sim 2$  arcsec



Lin et al., 2002

# RHESSI Imaging Spectroscopy



F1309\_1

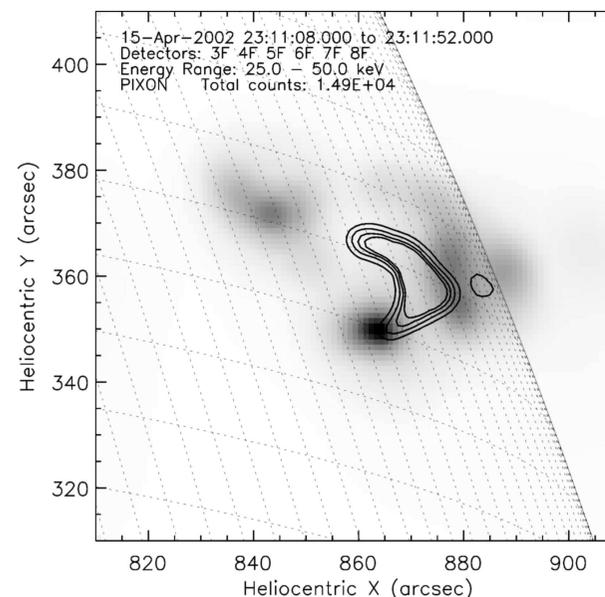
Lin et al., 2002

demo...

# ERUPCE Z RHESSI

- neobvyklý hard X-ray zdroj ve vrcholu smyčky (loop top source), 25 – 50 keV (kontury 6 – 12 keV)

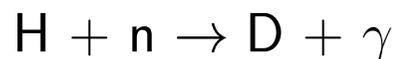
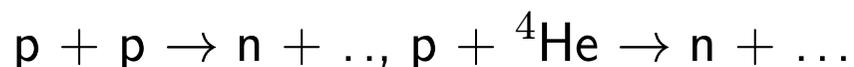
- vysoká sloupcová hustota



Veronig & Brown, 2004

- 1. pozorování dvojitého  $\gamma$  zdroje

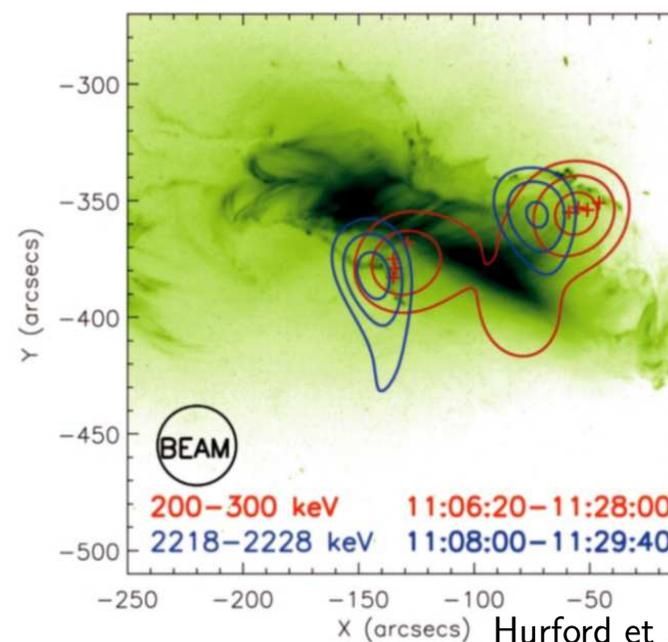
- 2.2 MeV neutron capture line



- ionty urychlené v erupci

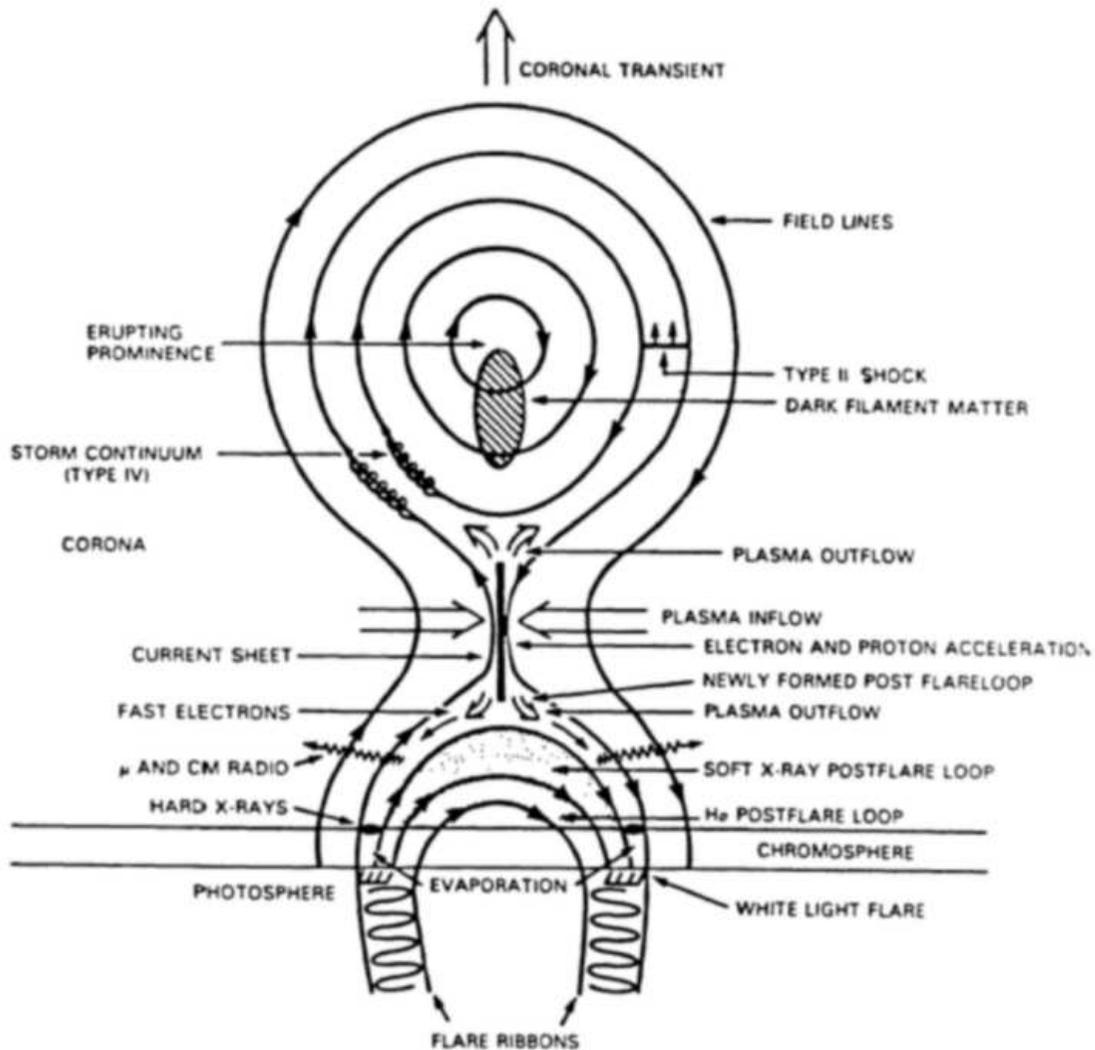
- neobjasněný posun mezi X-ray a  $\gamma$  zdroj

- movies...



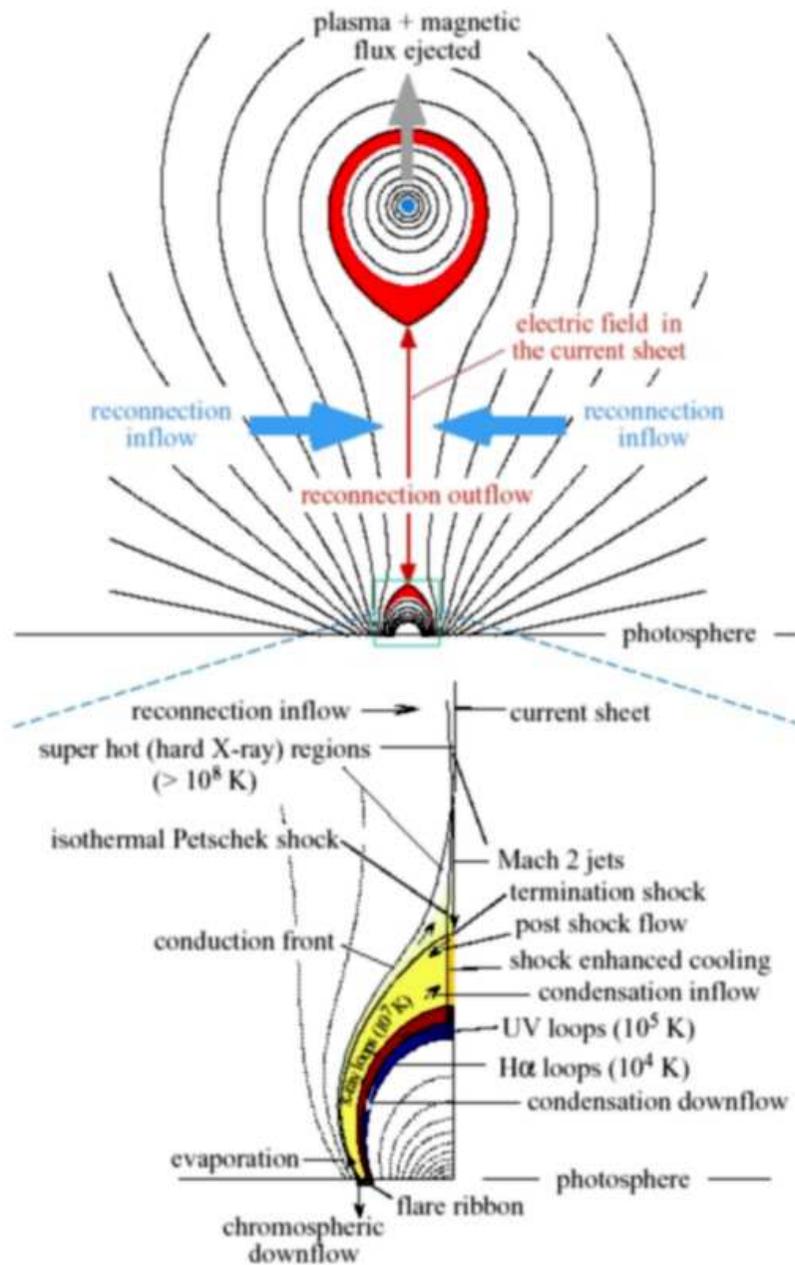
Hurford et al., 2006

# MODEL ERUPCÍ

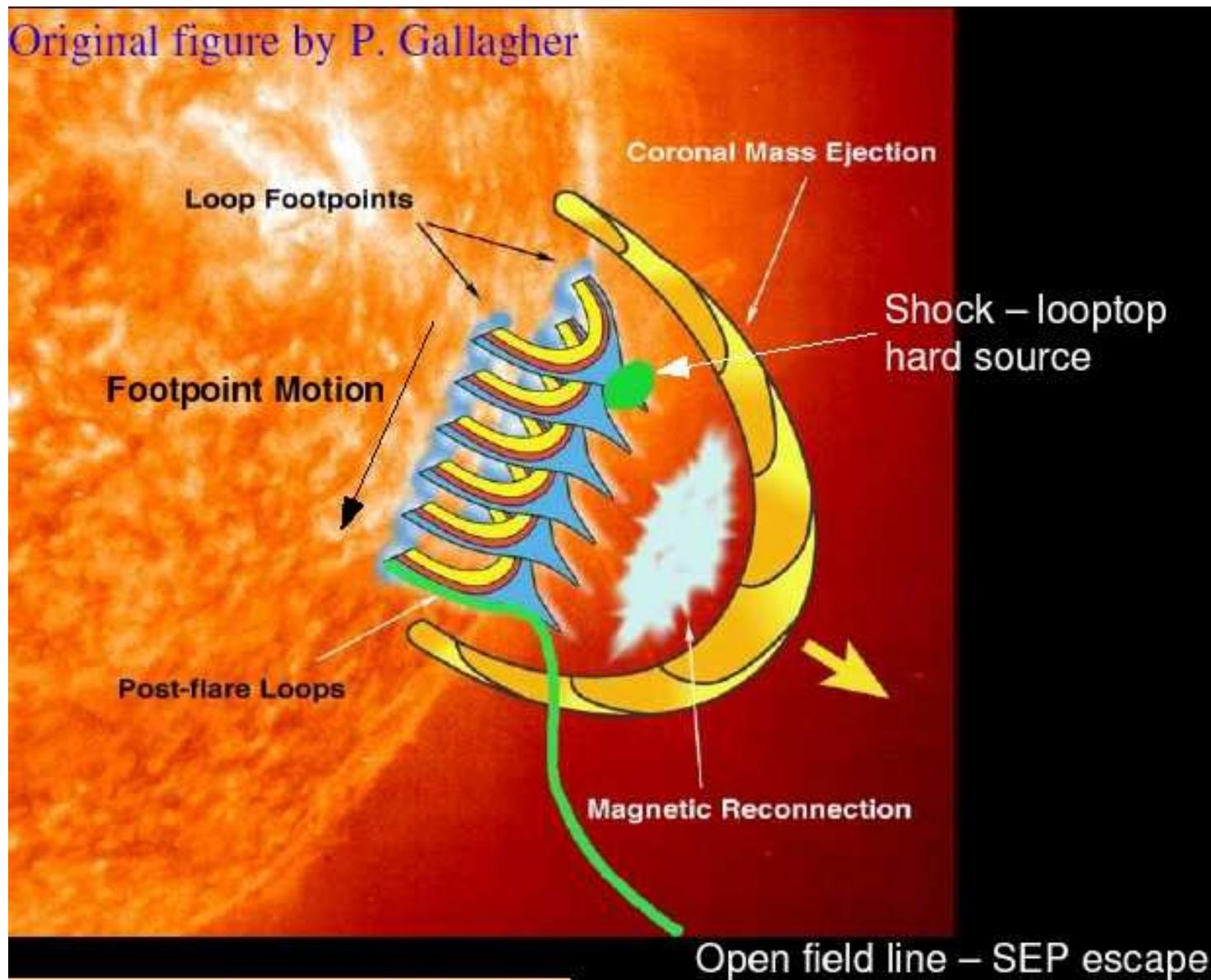


- standardní model erupce
- dvouvláknová erupce
- uvolnění energie při rekonexi mag. pole
- ohřev plasmy, urychlení částic
- svazky: forma transportu energie do nižších vrstev
  - ztráta energie v Coulombických srážkách  $\Rightarrow$  ohřev
  - X-ray, rádiová emise, polarizace záření
- expanze horké plasmy
- postupné chladnutí smyček

# MODELY ERUPCÍ



# MODELY ERUPCÍ



Smith, 2004

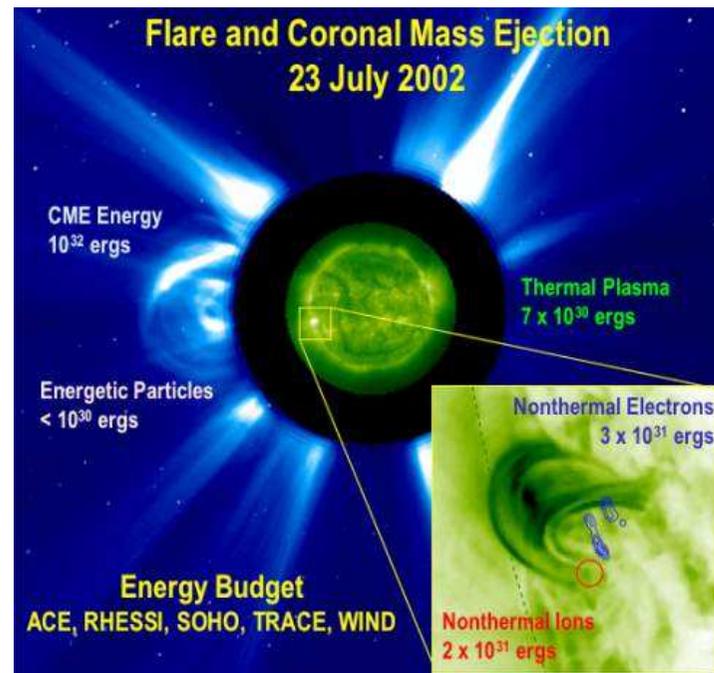
viz archív <http://solarmuri.ssl.berkeley.edu/~hudson/cartoons/>

# SLUNEČNÍ PLASMA A URYCHLENÉ ČÁSTICE

- chromosféra  $n \approx 10^{12} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T \approx 10^4 \text{ K}$
  - korona  $n \approx 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T \approx 10^7 \text{ K}$
  - erupční oblast:  $L \approx 10^9 \text{ cm}$ ,  $V \approx 10^{27} \text{ cm}^3$ ,  $N = nV \approx 10^{37}$  částic
  - magnetická energie:  $E_B = B^2V/8\pi \approx 4 \times 10^{25} B^2 \text{ erg}$ ,  $B \approx 100 \text{ G}$ 
    - střední energie na částici  $\bar{E} = B^2/8\pi n \approx 2.5 B^2 \text{ eV} \approx 25 \text{ keV}$
- ⇒ velký počet energetických částic, nemaxwellovské rozdělení

## “Typický elektronový svazek”

- mocninná funkce  $\sim E^{-\delta}$
- $\delta = 2 - 7$
- počet částic  $10^{37} \text{ s}^{-1}$
- energie  $\sim 10^{31} \text{ erg}$



Emslie et al. 2004

# 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>

zejména G. Holman: Introduction to Solar Flares