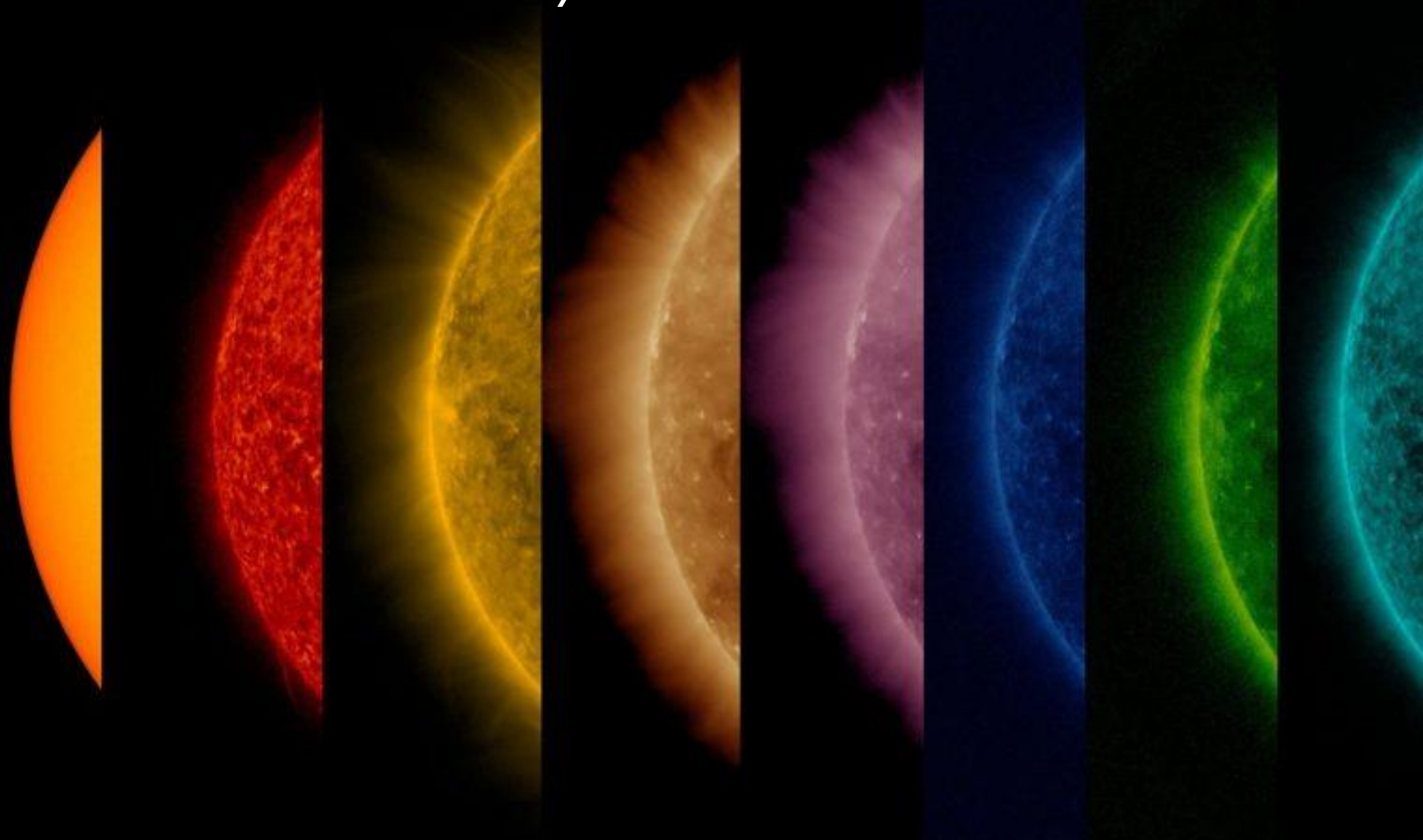


# *rozbłyski słoneczne*



SDO/HMI Quick-Look SDO/AIA 304 2 SDO/AIA 171 2 SDO/AIA 193 SDO/AIA 211 SDO/AIA 335 SDO/AIA 94 SDO/AIA 131

# rozbłysk słoneczny – co to jest?

**Rozbłysk słoneczny** – gwałtowne przejściowe pojaśnienie w atmosferze słonecznej (fotosfera, chromosfera i korona), obserwowane w każdej długości fali promieniowania elektromagnetycznego, w skali czasowej od minut do godzin.

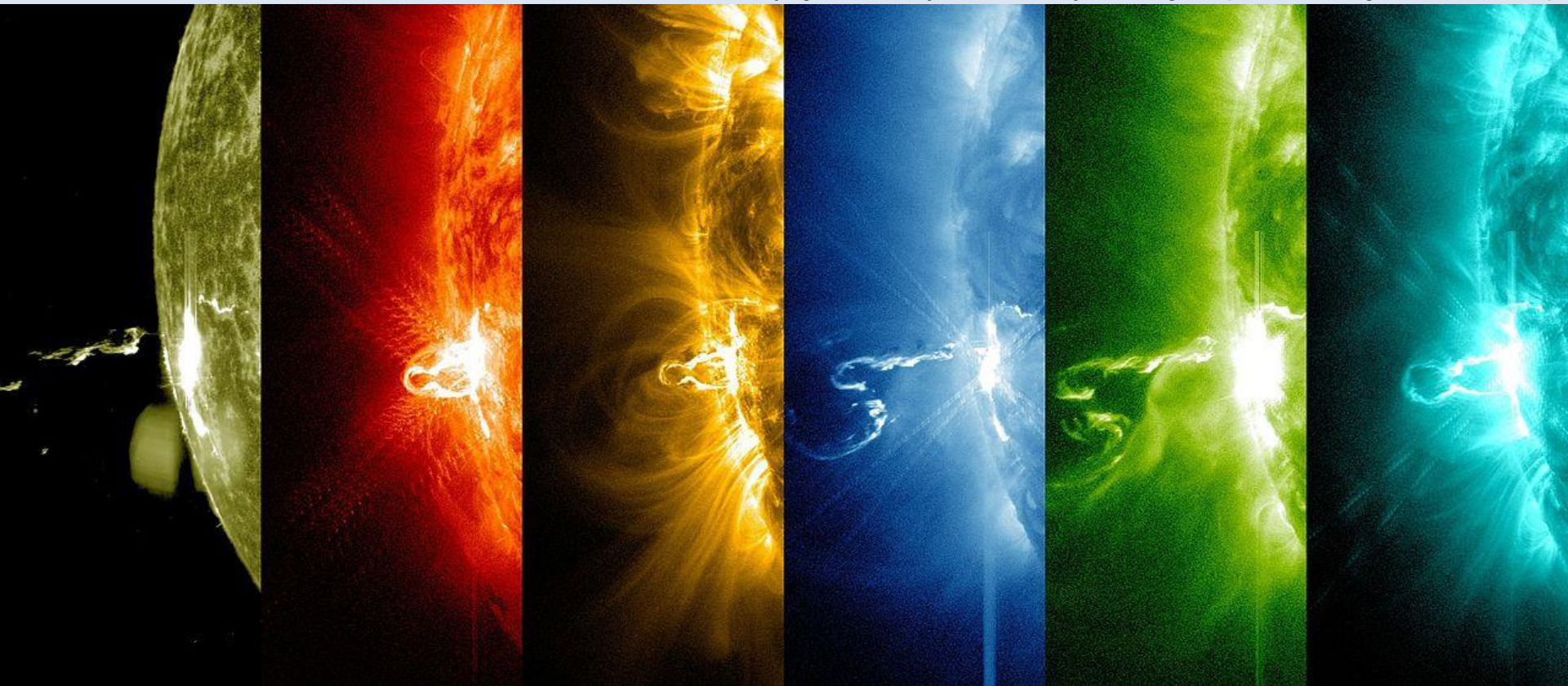
Wyróżnia się cztery fazy (a czasem inną liczbę):

- przedrozbłyskowa
- impulsowa
- błysku
- zaniku

Emisja rozbłysku jest wywołana przez:

- świecenie gorącej plazmy (emisja termiczna)
- nietermiczne cząstki (emisja nietermiczna)

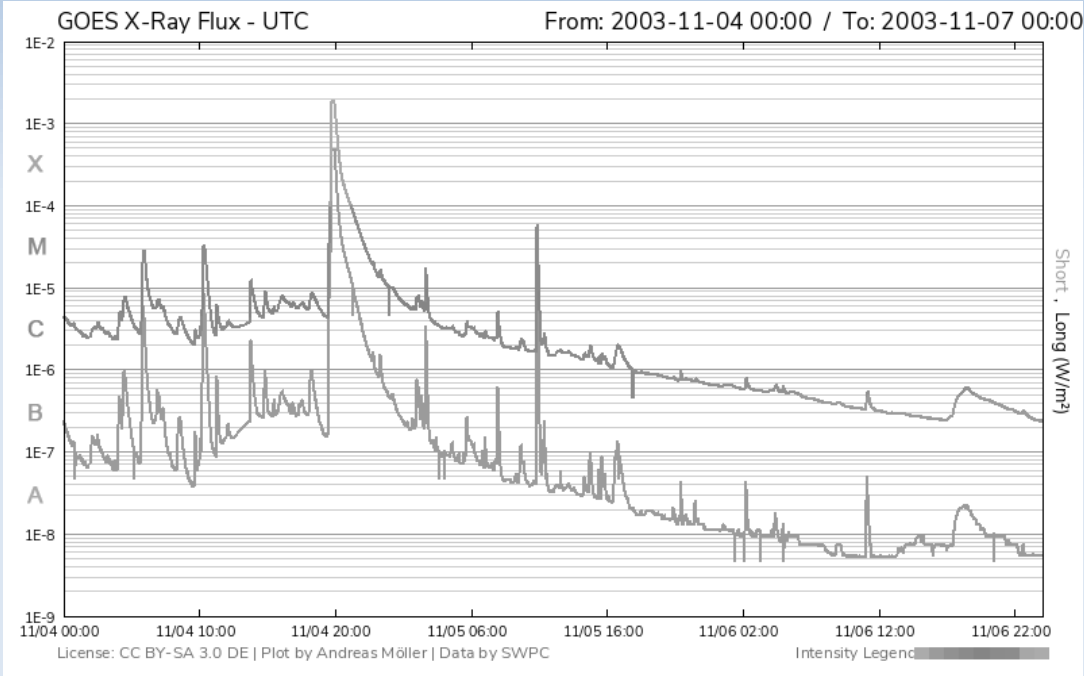
*erupcja i rozbłysk w różnych dł. fali (obserwacje z SQO/AIA)*



# klasyfikacje rozbłysków słonecznych

## klasyfikacja rentgenowska

| klasa | strumień w maksimum [W/m²] |
|-------|----------------------------|
| A     | $<10^{-7}$                 |
| B     | $10^{-7} - 10^{-6}$        |
| C     | $10^{-6} - 10^{-5}$        |
| M     | $10^{-5} - 10^{-4}$        |
| X     | $> 10^{-4}$                |



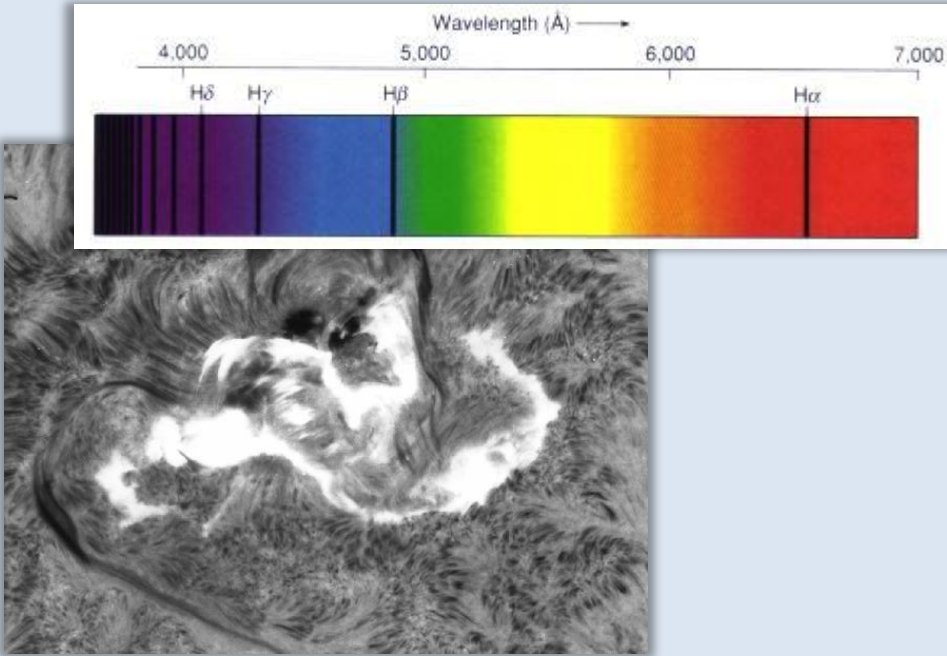
## klasyfikacja H $\alpha$

jasność  
(f)aint,  
(n)ormal,  
(b)right

+ powierzchnia

np.: 2b, 1f

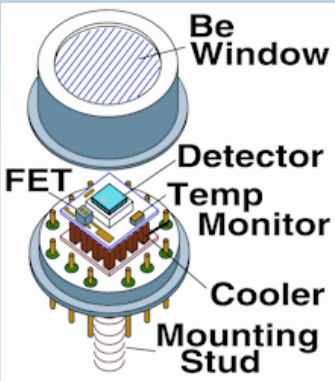
| klasa | powierzchnia [MH]<br>(milionowe części tarczy słonecznej) |
|-------|-----------------------------------------------------------|
| S     | $< 100$ (subflare)                                        |
| 1     | $100 - 250$                                               |
| 2     | $250 - 600$                                               |
| 3     | $600 - 1200$                                              |
| 4     | $> 1200$                                                  |





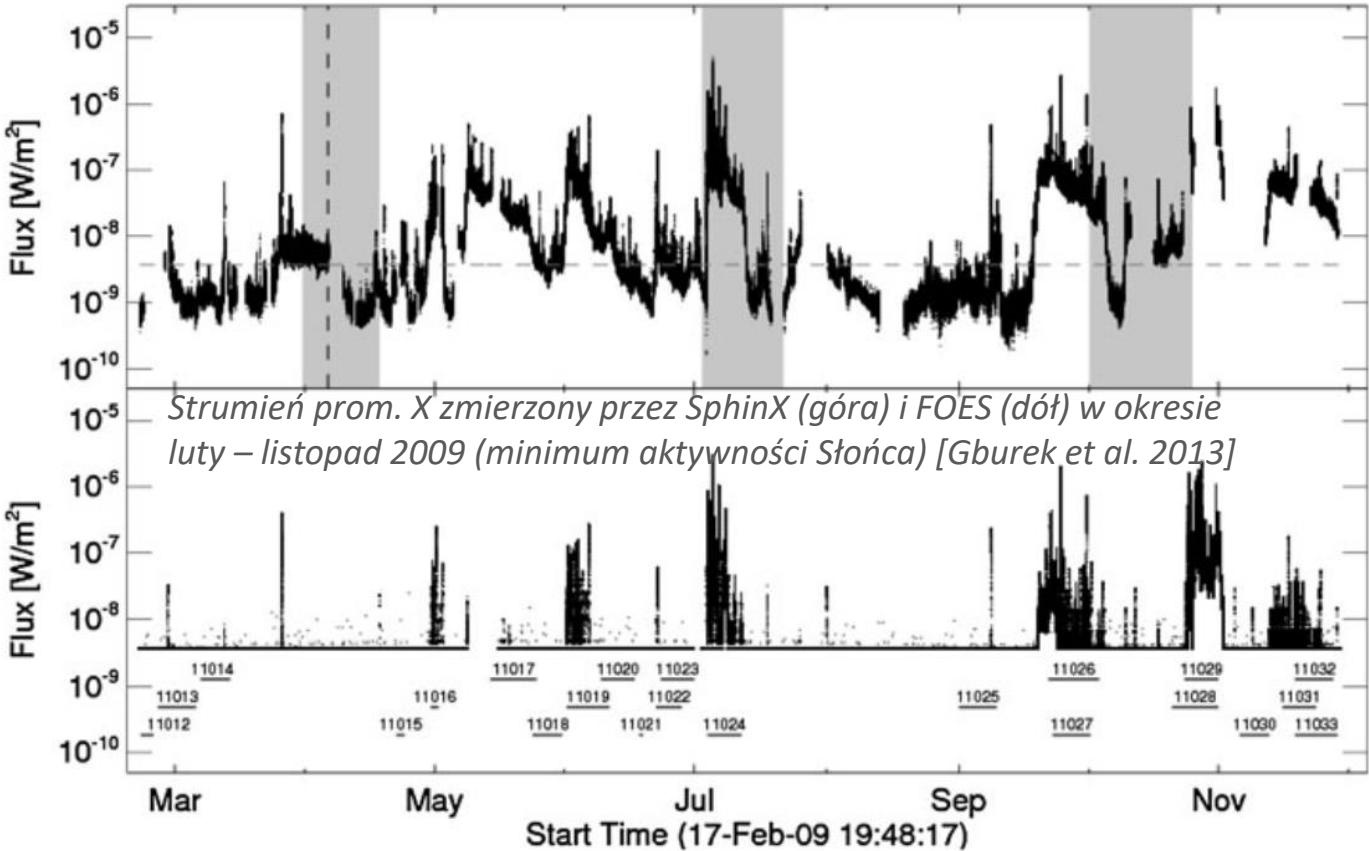
## Solar Photometer in X-rays (SphinX)

obserwacje słonecznego promieniowania  
rentgenowskiego w zakresie  $\approx 1 - 15$  keV  
instrument zbudowany przez grupę z ZFS CBK

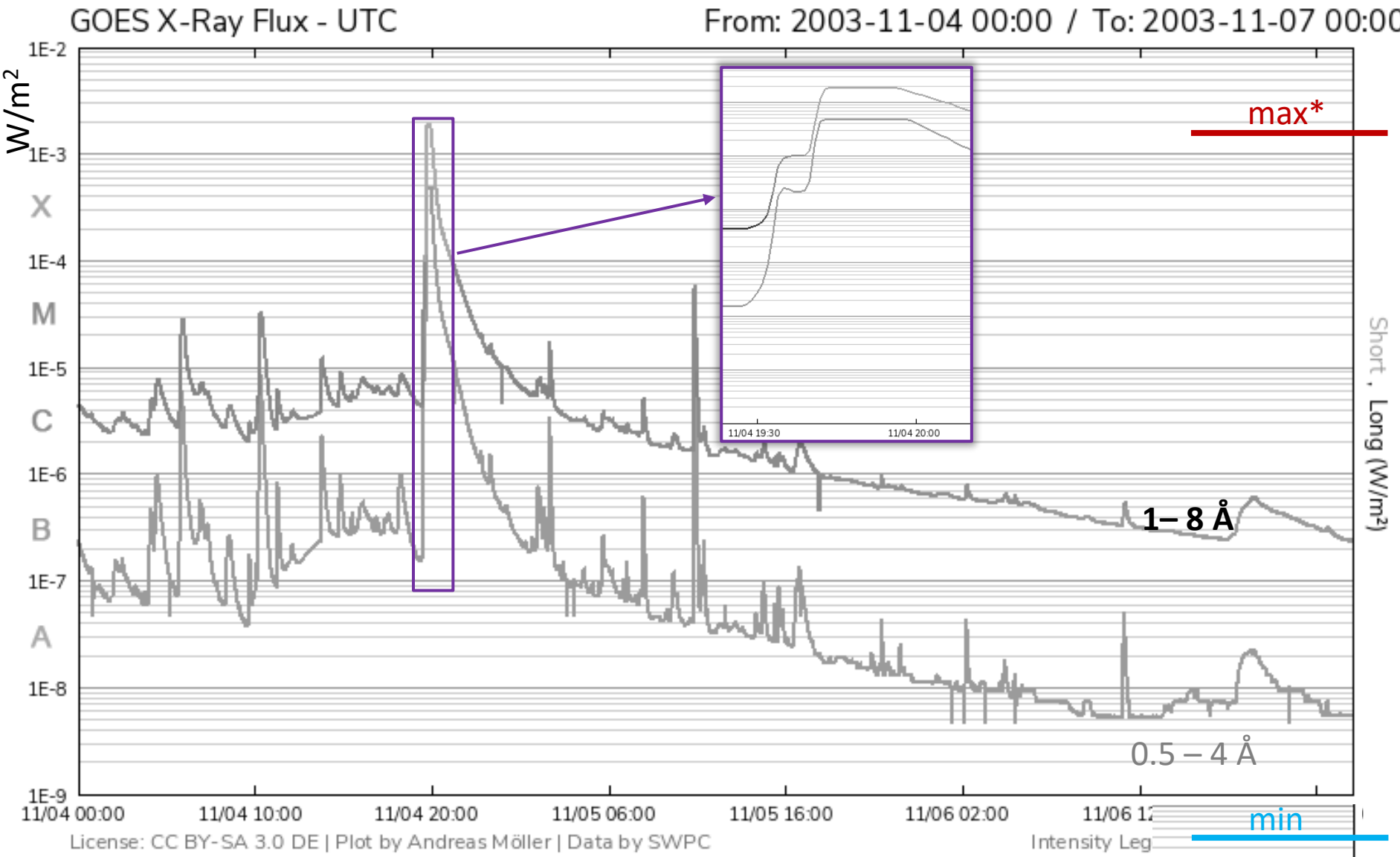


| klasa | strumień w maksimum (W/m <sup>2</sup> ) |
|-------|-----------------------------------------|
| Q     | $10^{-10} - 10^{-9}$                    |
| S     | $10^{-9} - 10^{-8}$                     |
| A     | $10^{-8} - 10^{-7}$                     |
| B     | $10^{-7} - 10^{-6}$                     |
| C     | $10^{-6} - 10^{-5}$                     |
| M     | $10^{-5} - 10^{-4}$                     |
| X     | $> 10^{-4}$                             |

klasy wprowadzone przez zespół SphinX



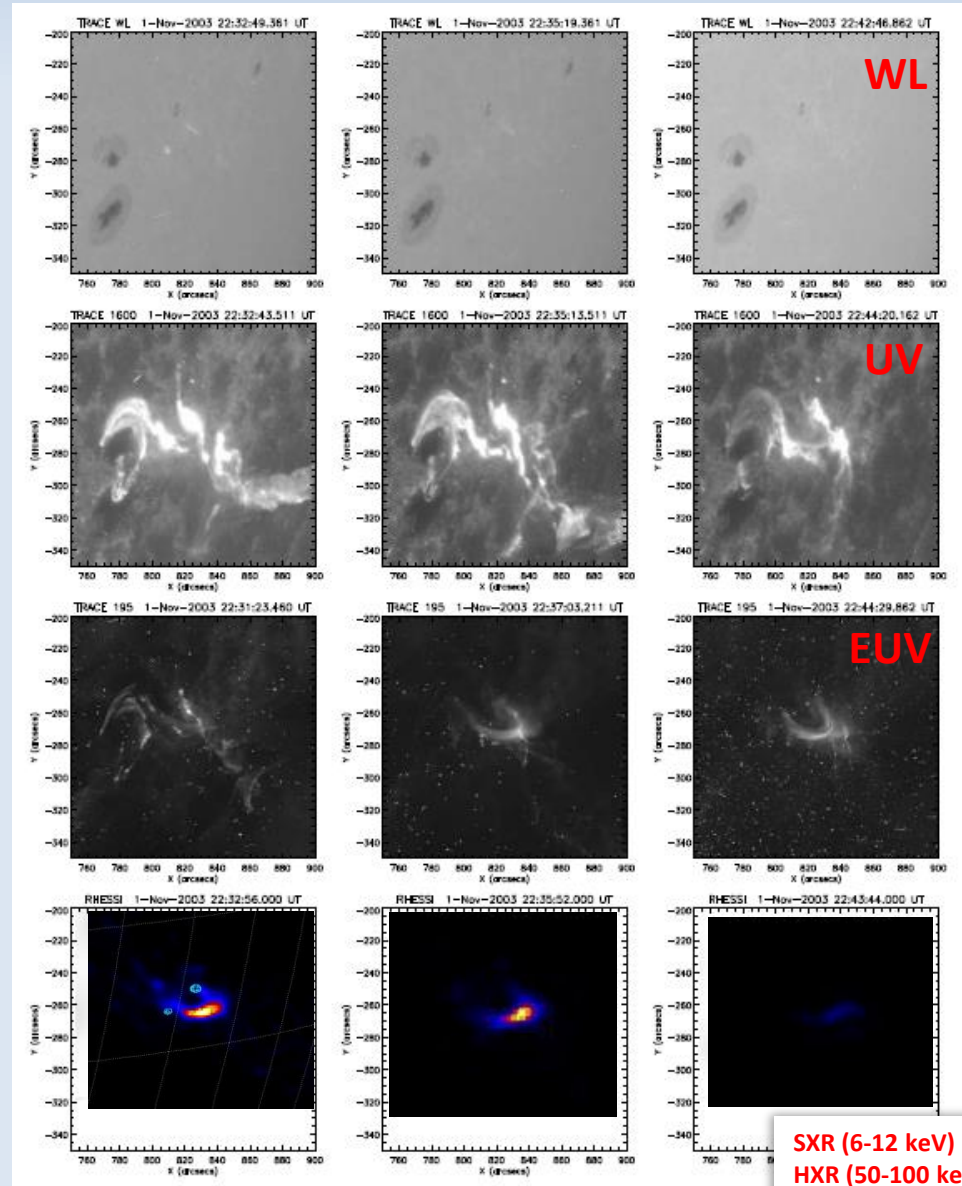
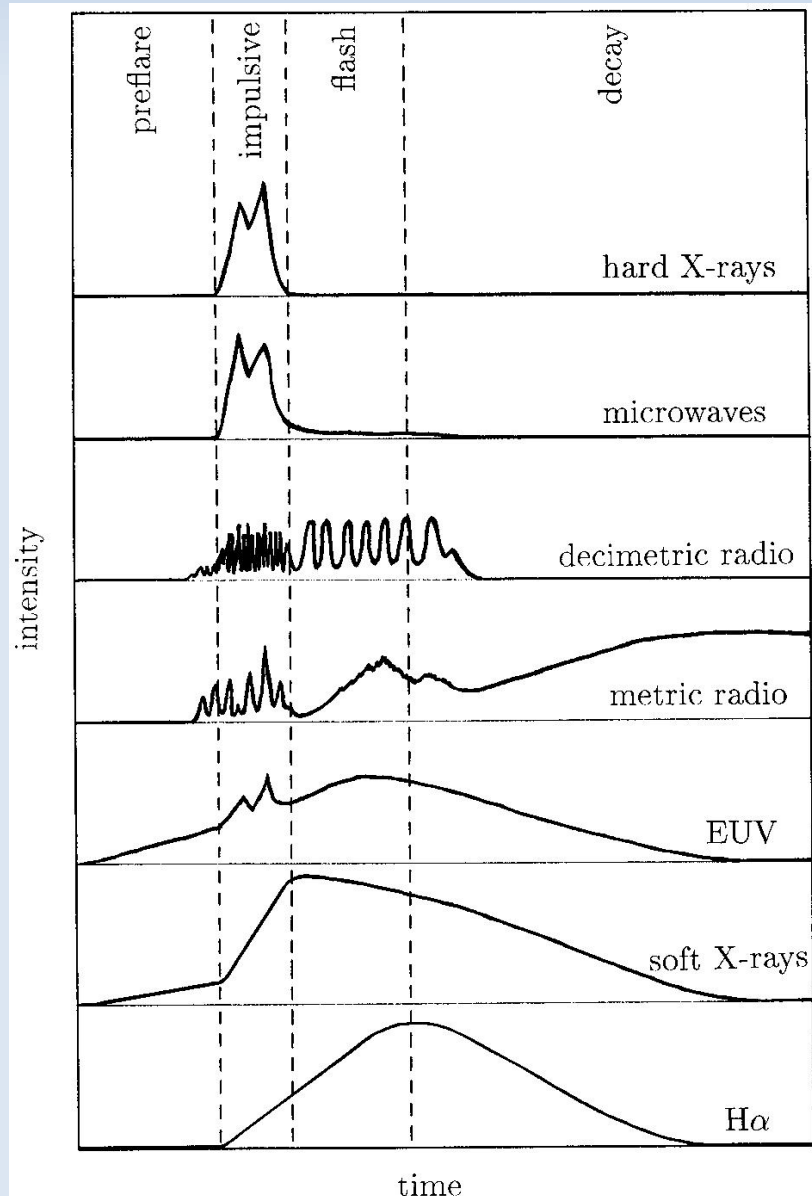
# zmienność Słońca w zakresie rentgenowskim



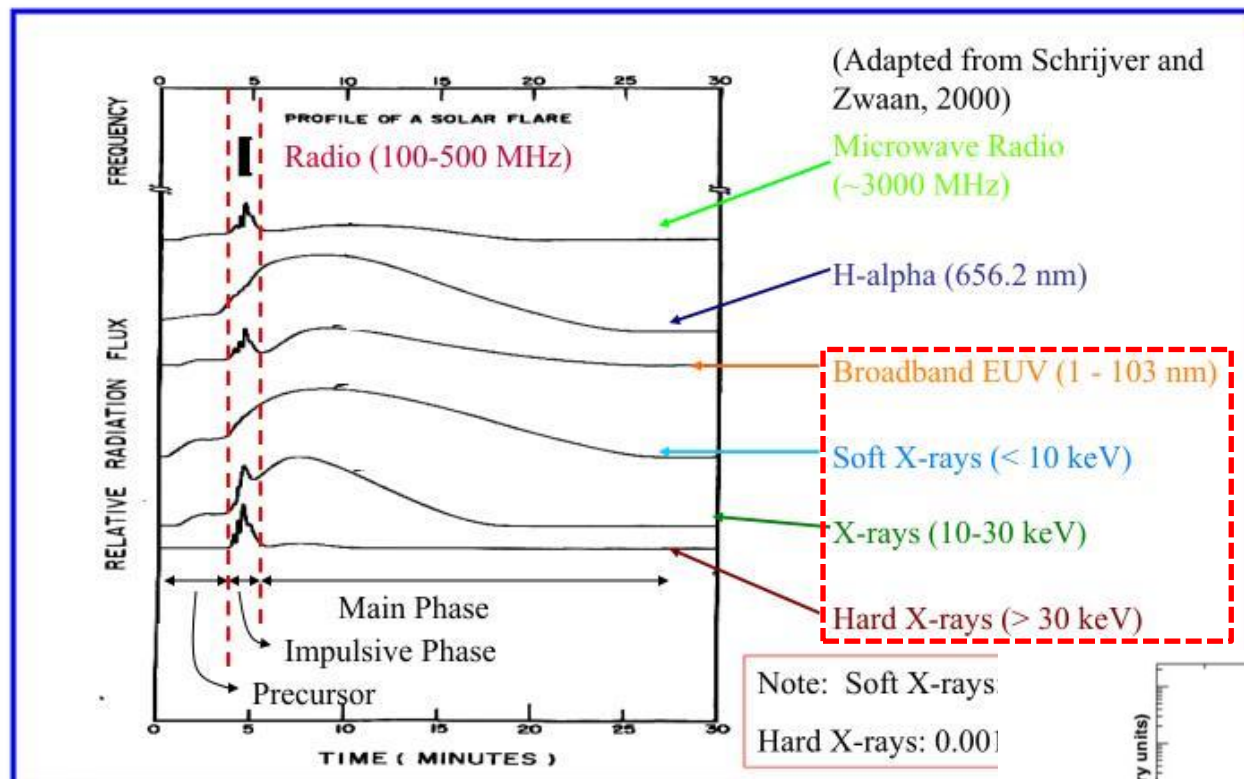
Zmienność Słońca w zakresie X sięga  $10^6 - 10^7$ . Na wykresie krzywa blasku najsilniejszego zaobserwowanego w zakresie X rozbłysku (maksymalna zarejestrowana kiedykolwiek jasność Słońca w zakresie X, GOES). Najniższą zarejestrowaną jasność oznacza linia niebieska (pomiar SphinX, 2009).

# rozbłysk słoneczny – obserwacje w różnych zakresach widma

schematyczny podział e`wolucji typowego rozbłysku na fazy – przebieg zmian jasności rozbłysku zależy od zakresy widmowego wybranego do obserwacji



## Phases of Solar Flares



Inny podział na fazy:

- prekursor/przedimpulsowa
  - impulsowa
  - główna/gradualna
- lub

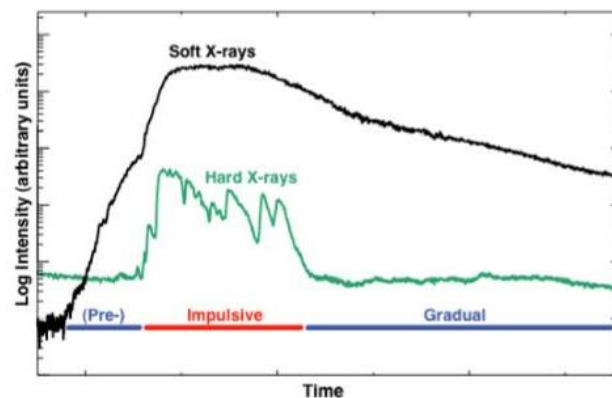
- narastania
- maksimum
- zaniku

Najważniejsze tu to:

różny wygląd krzywych blasku w różnych zakresach fal EM

Dlaczego?

Zróźnicowanie warunków fizycznych i mechanizmów emisji w rozbiłyskach

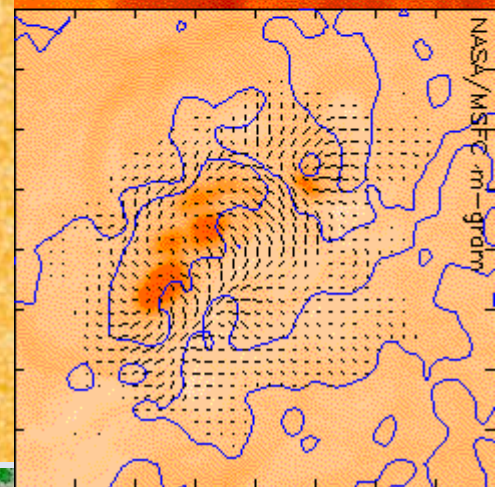
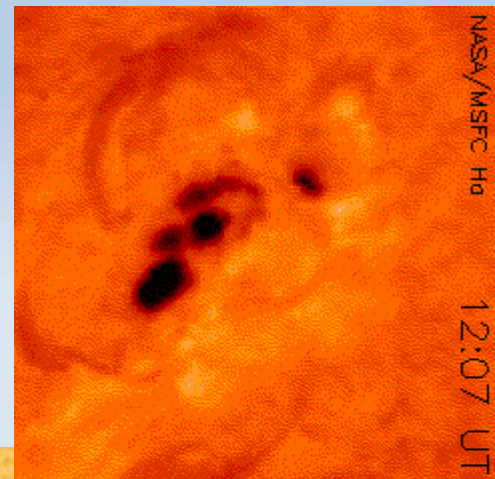


- Impulsive (rise) phase - bursty HXR, fast but smoothly rising SXR
- Gradual (decay) phase - little to no HXR, gradual decline in SXR
- Pre-impulsive gradual rise observed in some flares

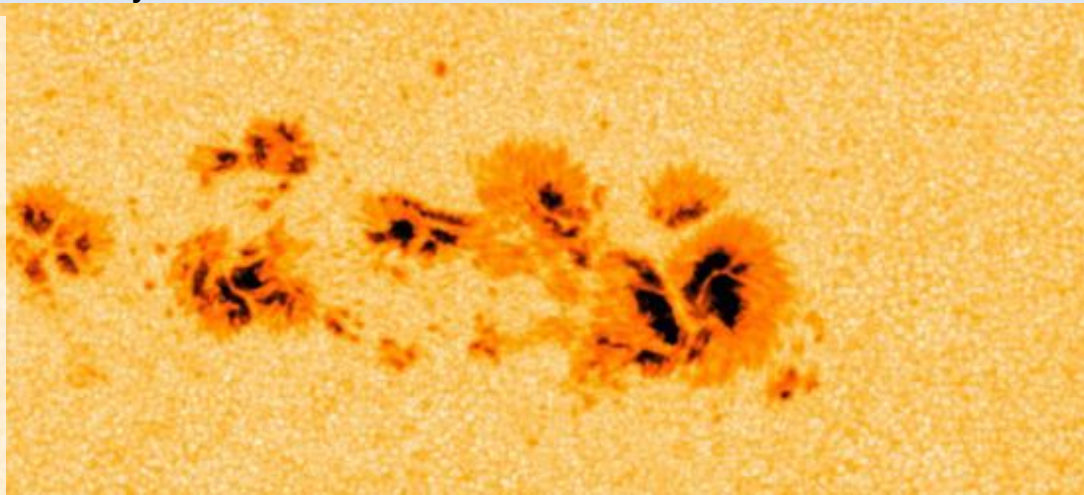
# rozbłysk słoneczny – czynnik sprawczy

Czynniki sprzyjające tworzeniu się rozbłysków (zamianie energii pól magnetycznych na energię zjawisk aktywnych)

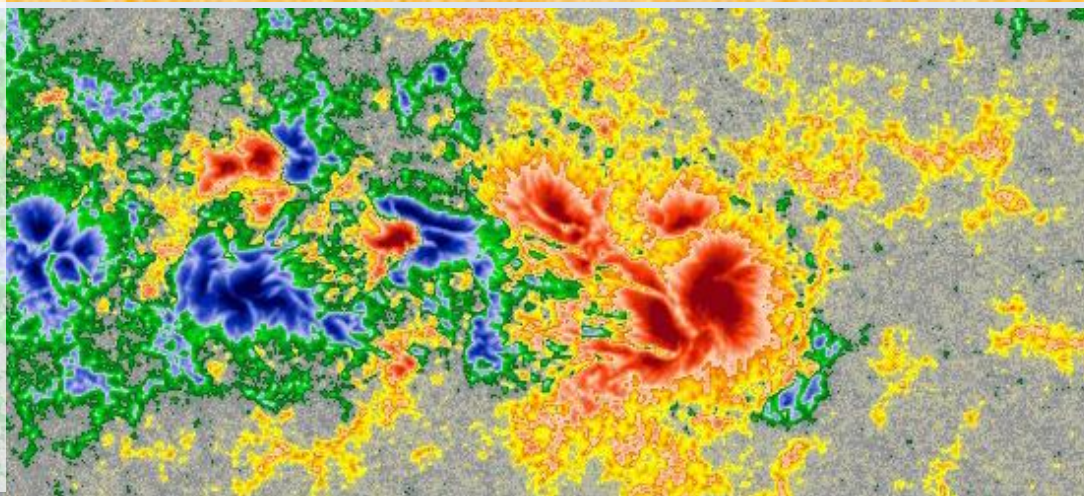
- skomplikowana 3D geometria
- silnie skręcone pole (shear)
- wpływ nowego pola (emerging flux)
- wąskie kanały pola mag. horyzontalnego o dużym natężeniu widoczne w pobliżu linii neutralnej



Przykład bardzo złożonej grupy plam słonecznych o klasyfikacji magnetycznej typu Beta-Gamma-Delta, zaobserwowanej przez instrument HMI (satelita SDO). Ten obszar plam słonecznych był źródłem silnego rozbłysku słonecznego klasy X2.3. Górne zdjęcie przedstawia obszar plam w zakresie widzialnym. Dolne zdjęcie to

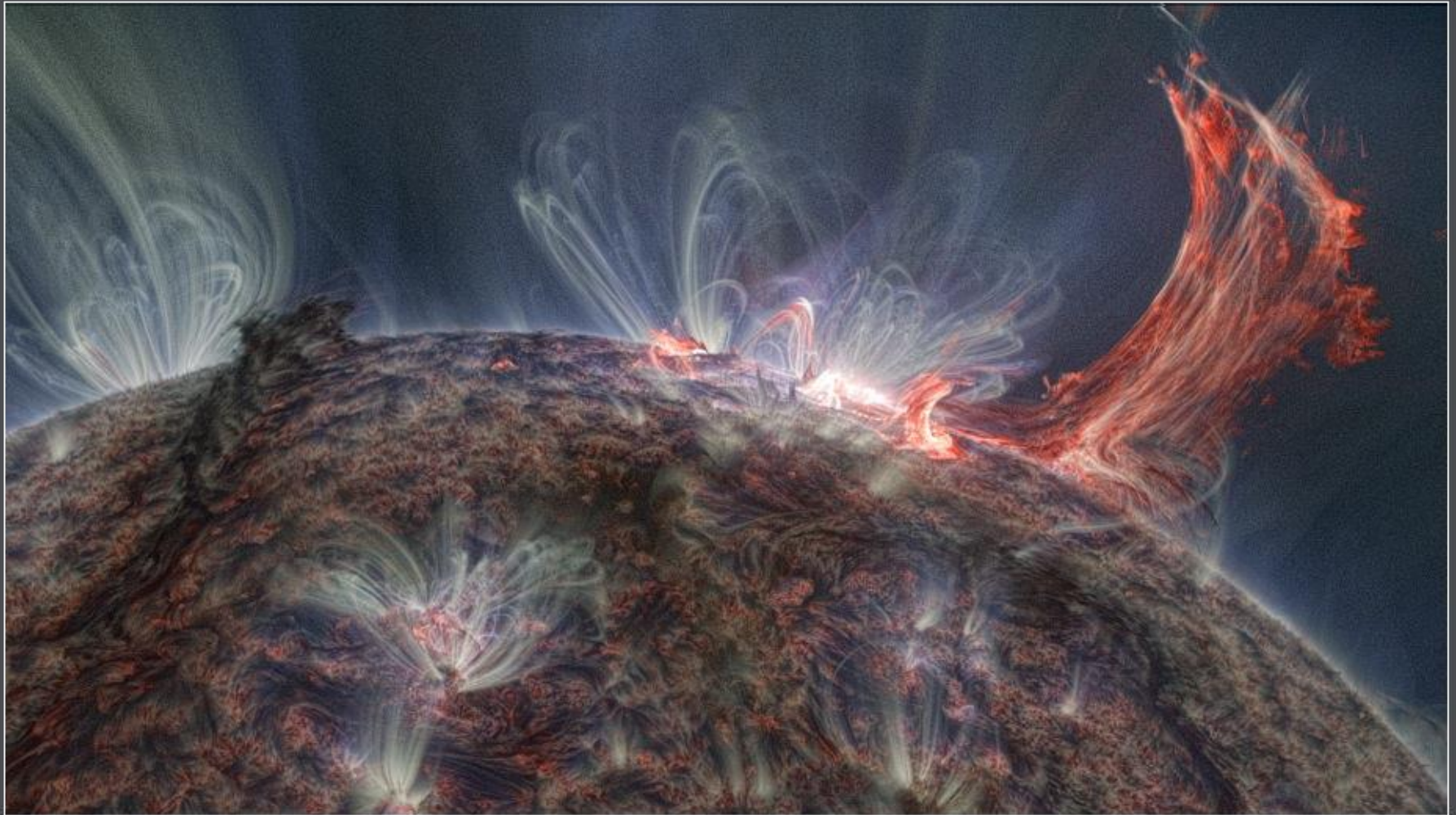


magnetogram, pokazujący rozkład pól magnetycznych obszaru plam. Kolor czerwony wskazuje plamy lub obszary o biegunowości S, a kolor niebieski oznacza obszary z plamami o biegunowości N. Widoczne wymieszanie biegunowości pola mag. – złożona struktura magnetyczna sprzyjająca silnej aktywności



Obraz obszaru aktywnego w linii Halfa (góra) i ten sam obraz (dół) z naniesioną linią neutralną (granica między pole N i S). Znaczniki (kreski) wskazują kierunek poziomej składowej pola magnet. Zwykle pole to skierowane jest poprzecznie do linii neutralnych, bezpośrednio od obszarów N do obszarów S. Tu w kilku obszarach znaczniki są skierowane prawie równoległe do linii neutralnych. Oznacza to silny shear linii mag.

## rozbłysk słoneczny – czynnik sprawczy

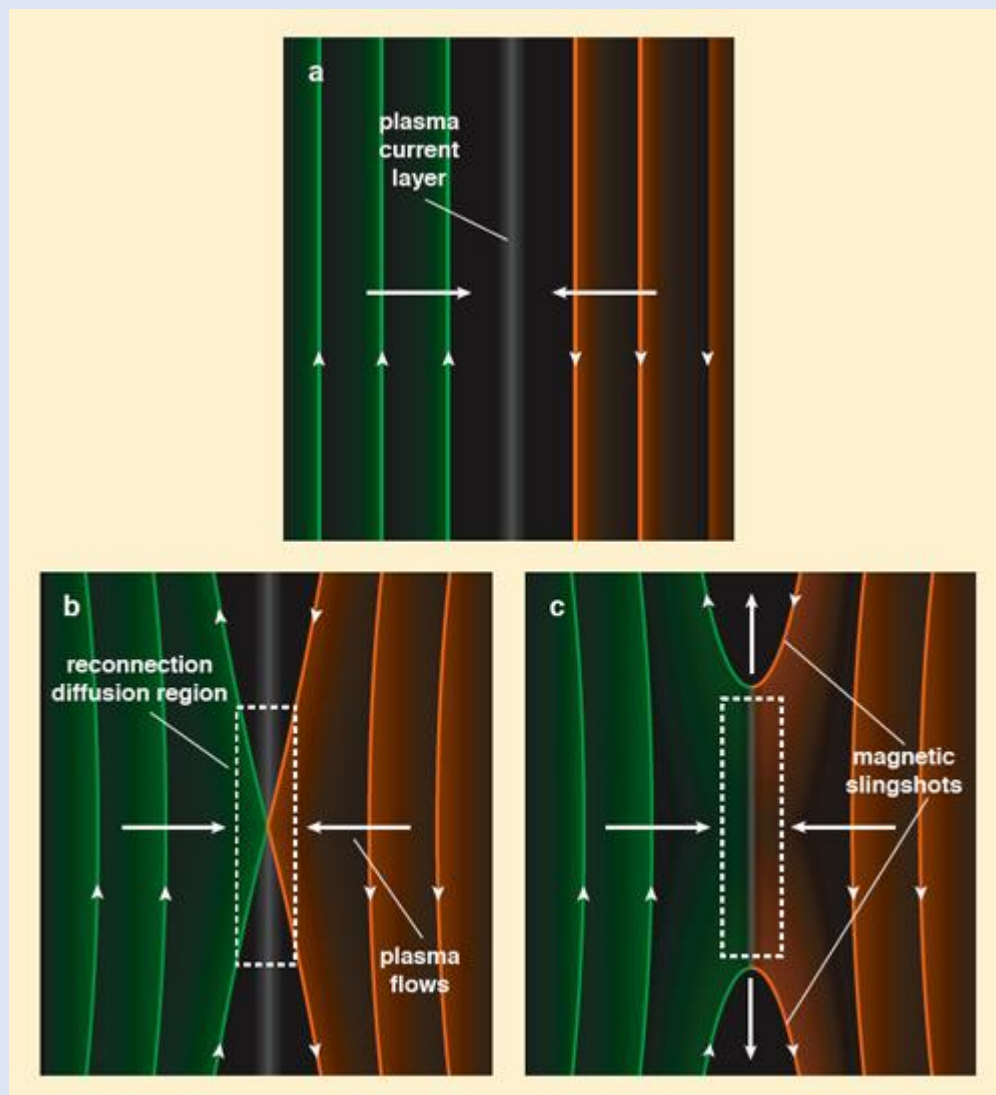
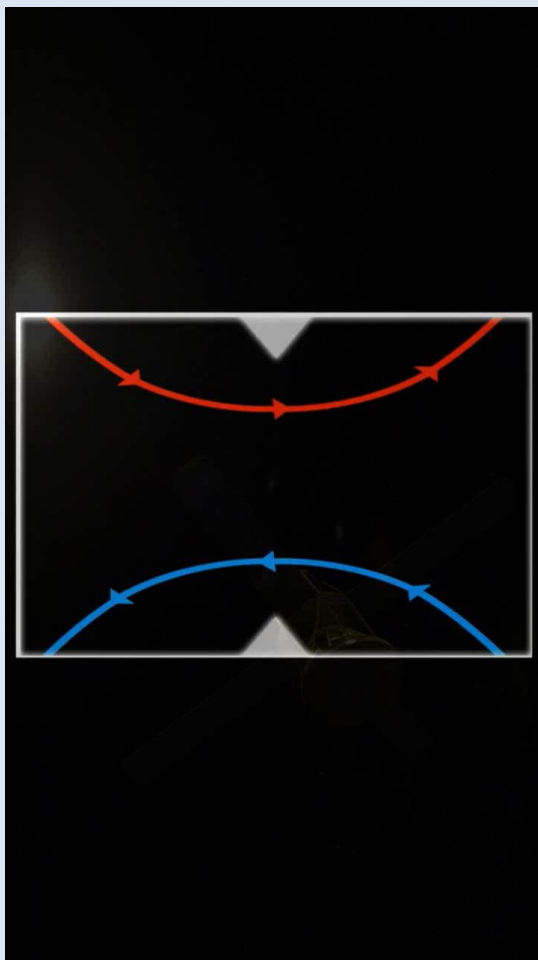


© 2015 Miloslav Druckmüller NASA SDO AIA 304 Å, 171 Å, 211 Å, PM-NAFE

*Obraz kompozytowy Słońca złożony z obrazów uzyskanych instrumentem AIA w trzech oknach widmowych (171, 211, 304 Å). Widoczna złożona struktura pól magnetycznych w koronie – łuki (pętle) magnetyczne wypełnione plazmą*

# rozbłysk słoneczny – czynnik sprawczy

Procesem umożliwiającym zamianę energii pola mag. na energię zjawisk aktywnych (m.in. rozbłysków) jest rekonekcja (przełączenie linii mag.). W obszarze styku antyrównoległych pól magnetycznych tworzy się warstwa prądowa (current sheet), w której dochodzi do przełączania i częściowej anihilacji pola mag., co uwalnia część energii zgromadzonej w polu magnetycznym i przekształca ją na inne formy energii (np.: energia kinetyczna cząstek).



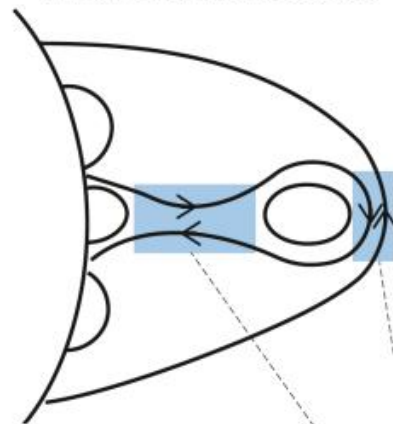
# rozbiłysk słoneczny – czynnik sprawczy

Zjawisko rekonekcji występuje nie tylko na Słońcu (a).

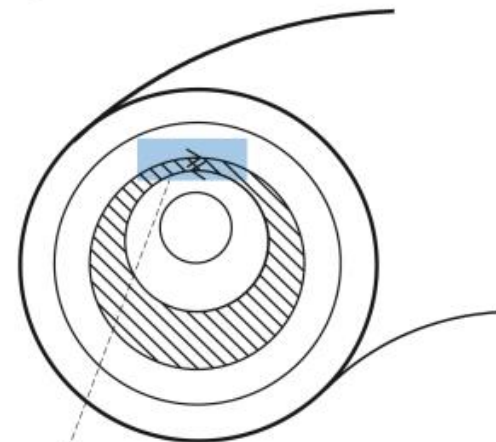
Również w tokamakach (b), magnetosferach planet (c) i magnetosferach gwiazd neutronowych (d) oraz w wielu innych obiektach.

Obszar rekonekcji zaznaczono na niebiesko.

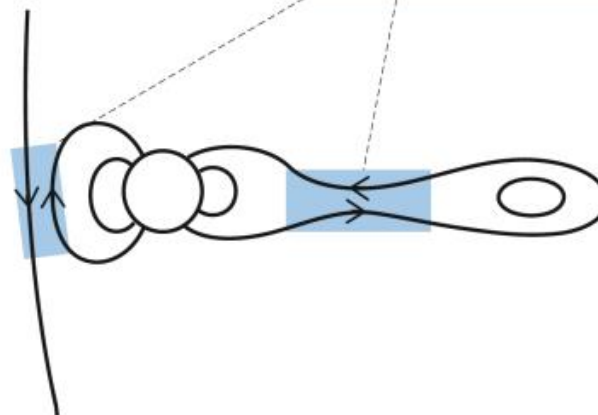
**a** Flare and breakout current sheets in the solar corona



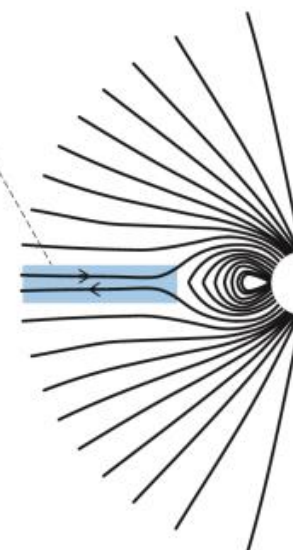
**b** Current sheet in tokamak



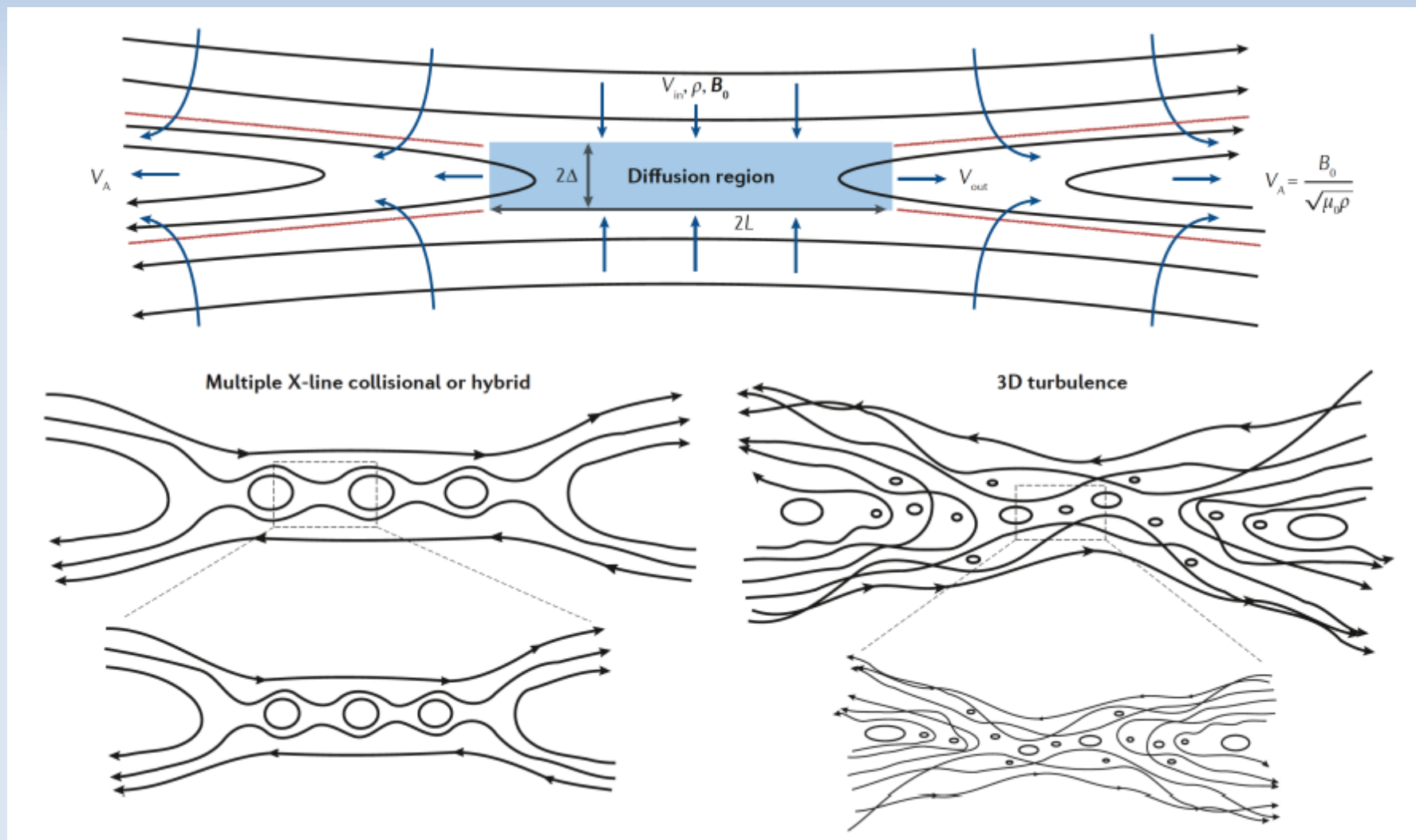
**c** Current sheets in Earth's magnetopause and magnetotail



**d** Current sheet in neutron star's magnetosphere

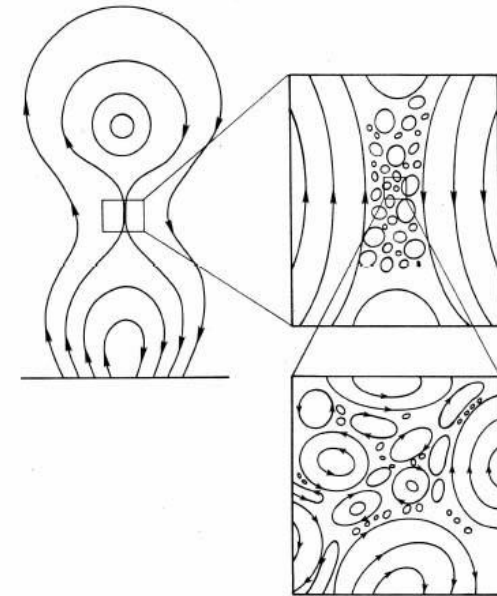
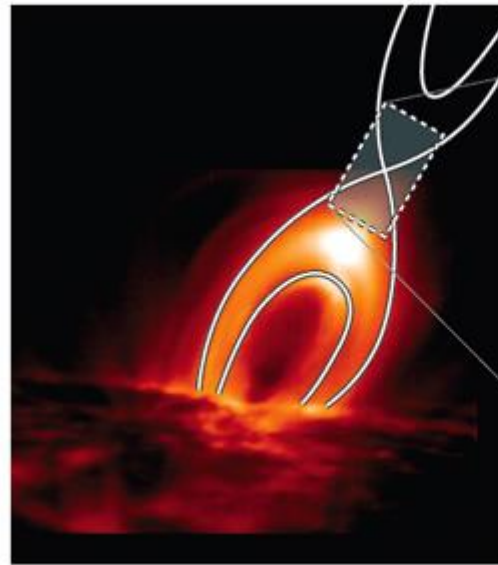
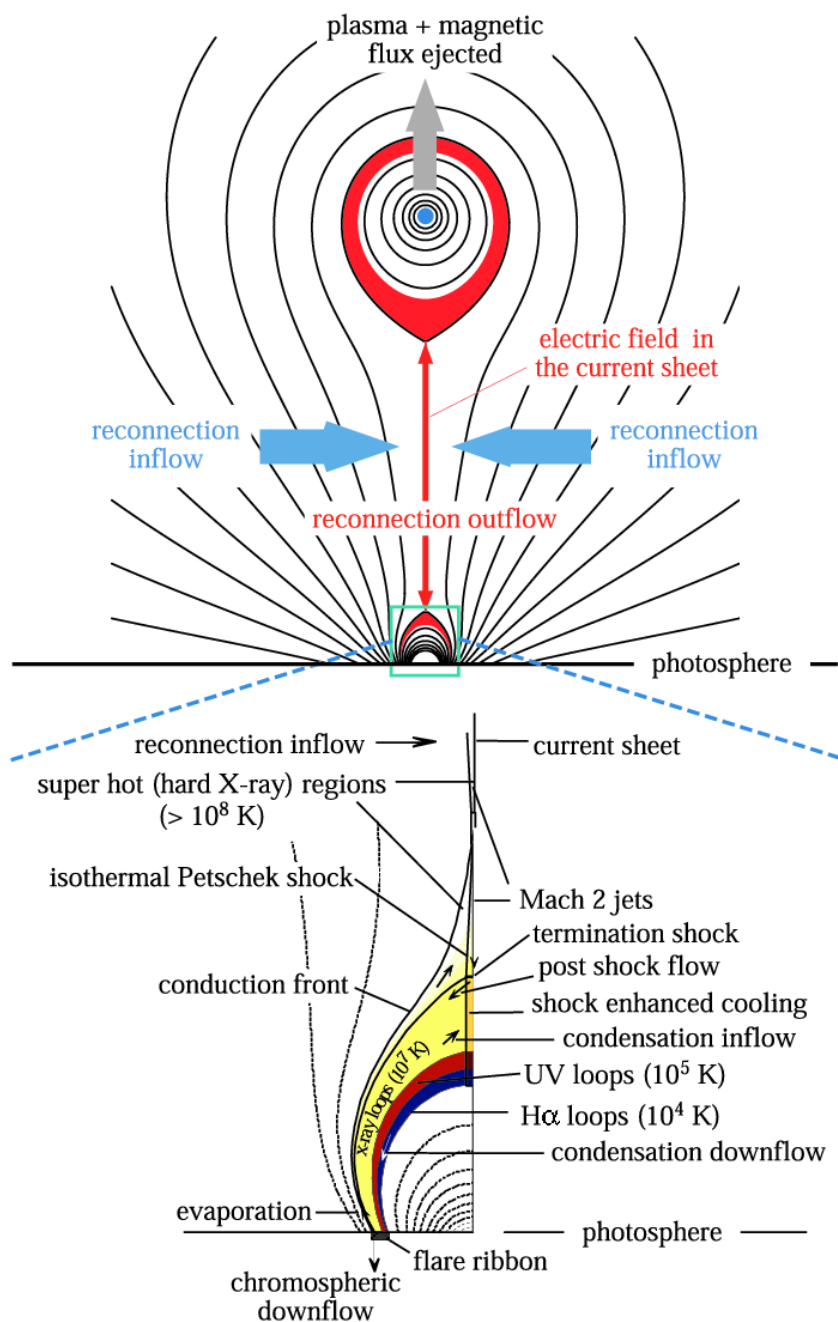


# rozbiłysk słoneczny – czynnik sprawczy



Centralna warstwa prądowa nie musi składać się z pojedynczego punktu X (przełączania linii).  
Obszar rekonekcji może być wypełniony wieloma punktami X, plasmoidami i być turbulentny  
(fraktalna warstwa prądowa).

# rozbłysk słoneczny – nasze wyobrażenia



- wydzielenie energii następuje wysoko w koronie słonecznej
- energia jest pożytkowana na fale uderzeniowe, przyspieszanie cząstek, podgrzanie plazmy
- przyspieszone cząstki rozchodzą się w strukturze rozbłyskowej dostarczając energię do chromosfery lub uciekają z korony
- podgrzana materia chromosferyczna wypełnia strukturę rozbłyskową

# rozbiłysk słoneczny – nasze wyobrażenia

Tzw. model standardowy (CSHKP) tłumaczy obserwowane cechy rozbiłysków słonecznych (różne zakresy promieniowania, parowanie chromosfery, erupcje itd.) poprzez proces rekonekcji magnetycznej.

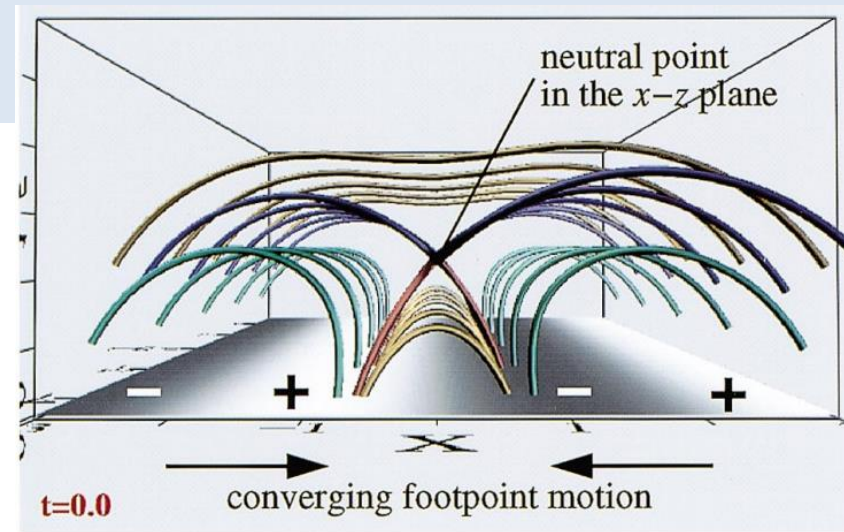
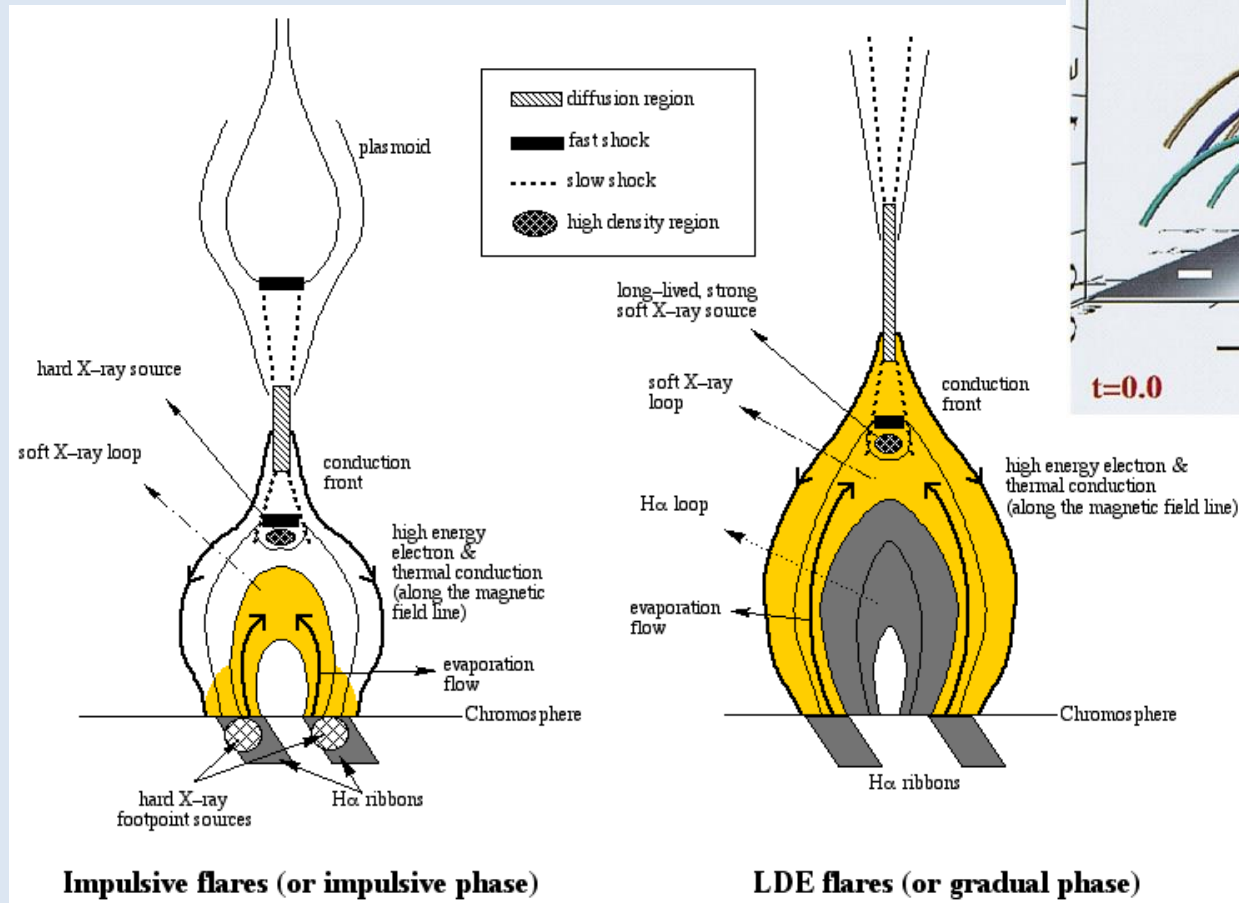
Carmichael, H. 1964, in AAS-NASA Symposium on Solar Flares, ed. W. N. Hess (NASA SP-50), 451

Hirayama, T. 1974, Sol. Phys., 34, 323

Kopp, R. A., & Pneuman, G. W. 1976, Sol. Phys., 50, 85

Magara, T., Mineshige, S., Yokoyama, T., & Shibata, K. 1996, ApJ, 466, 1054

Sturrock, P. A. 1966, Nature, 211, 695

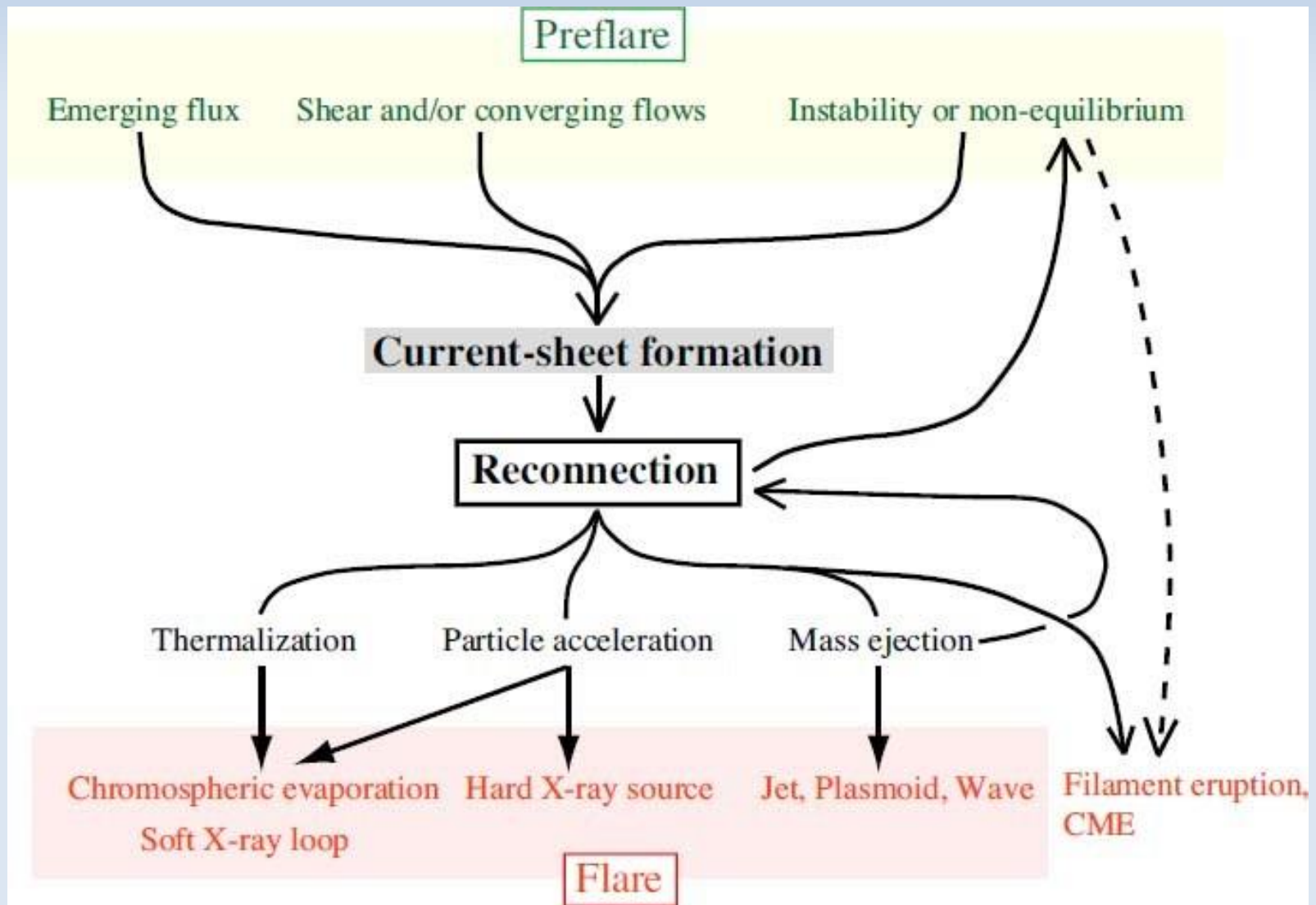


CSHKP nie jest jedynym modelem. Istnieje też model kwadрупolowy.

Uchida i in. 1999, PASJ 51, 553

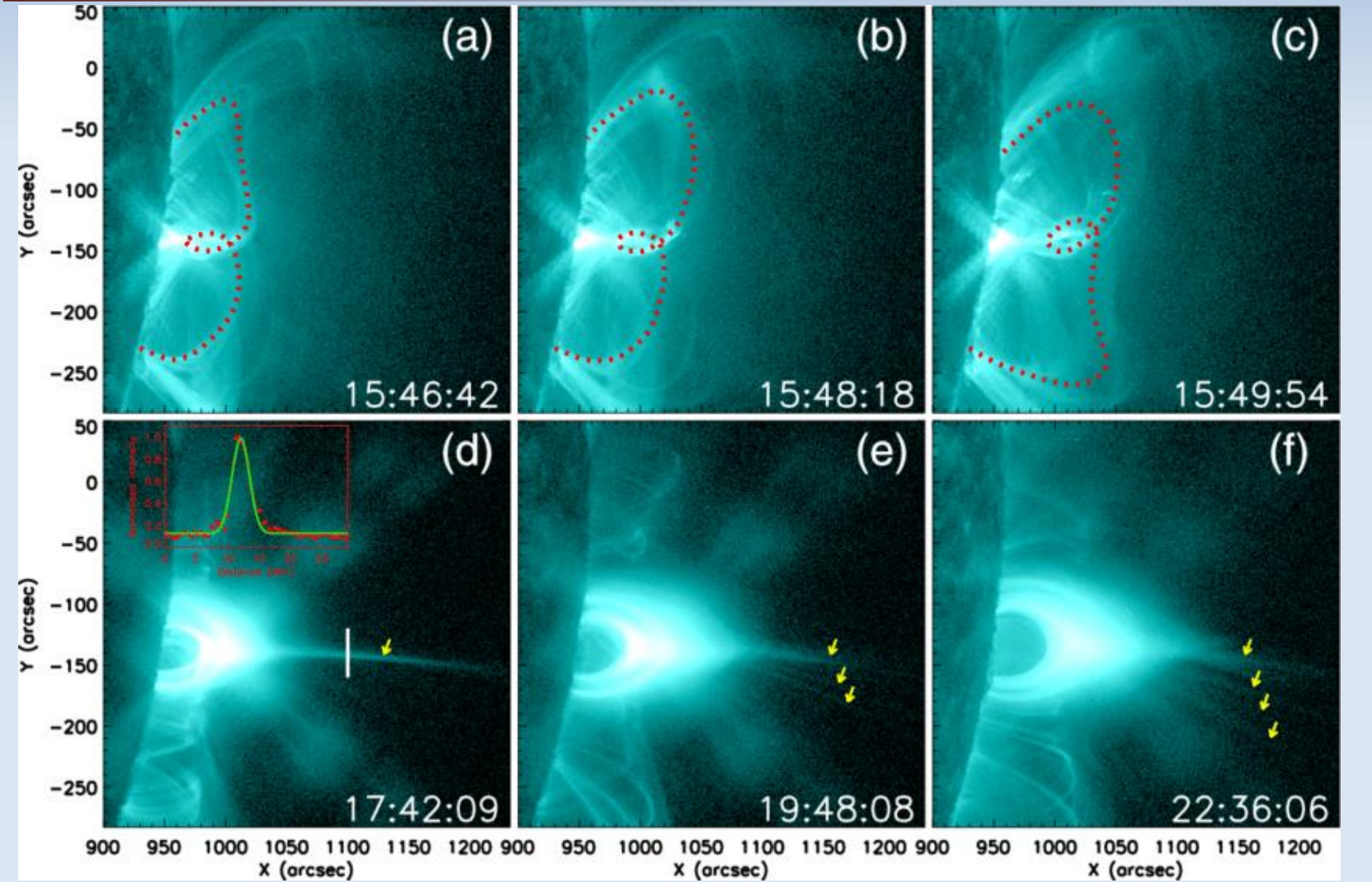
Hirose i in. 2001, ApJ 551, 586

# rozbłysk słoneczny – nasze wyobrażenia



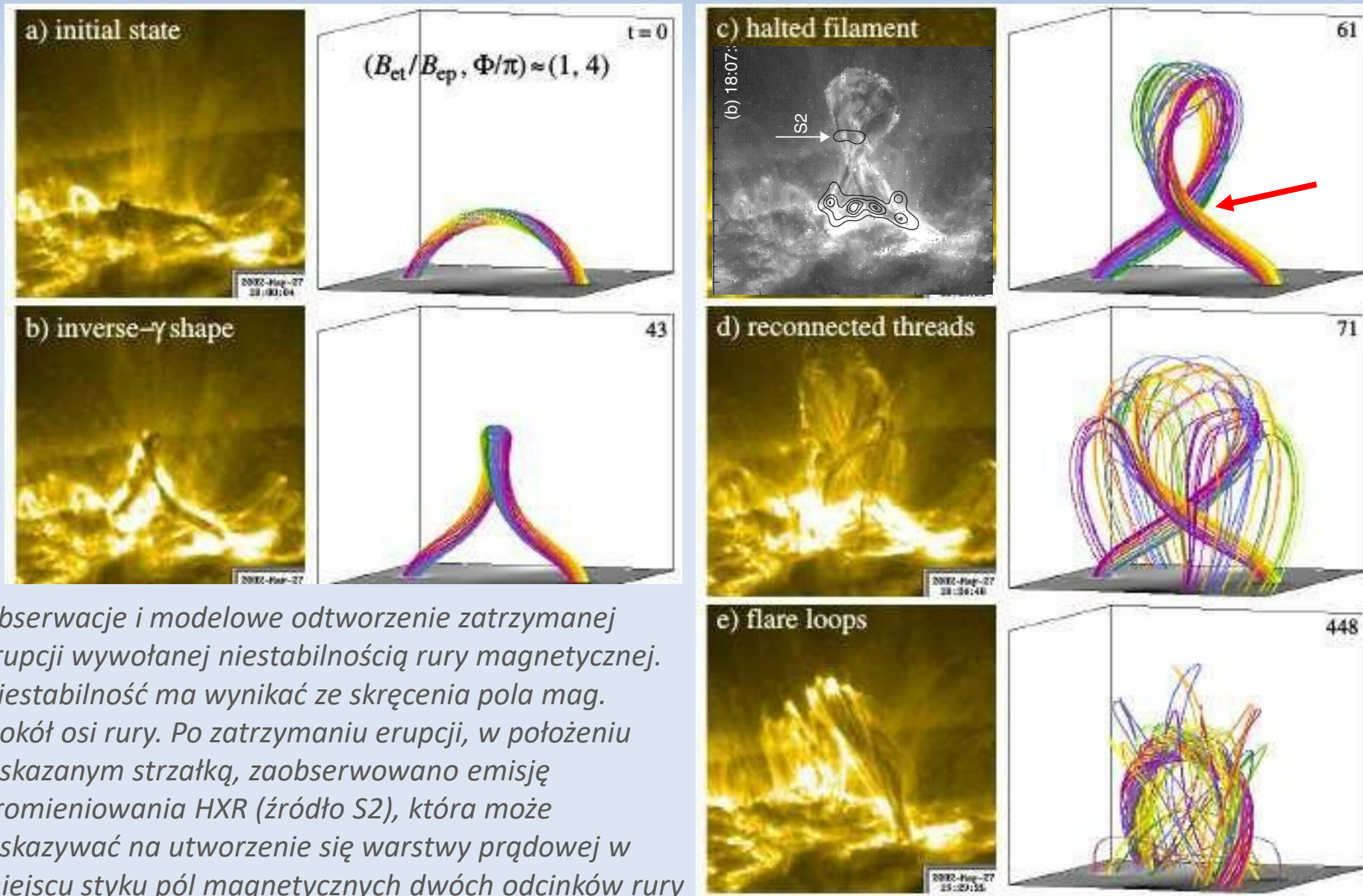
Procesy odpowiedzialne za rozbłyski i zjawiska stowarzyszone [Shibata & Magara 2011]

rozbłysk słoneczny – nasze wyobrażenia vs. obserwacje



Erupcja rury magnetycznej (linia kropkowana), która doprowadziła do utworzenia się warstwy prądowej (żółte strzałki) i rozbłysku poniżej (SDO/AIA 131 Å). Widać, że warstwa prądowa ma grubość zaledwie kilku tys. km. Rozmiar warstwy wzdłuż linii widzenia jest znacznie większy. [Yan et al. 2018]

# rozbłysk słoneczny – nasze wyobrażenia vs. obserwacje



Obserwacje i modelowe odtworzenie zatrzymanej erupcji wywołanej niestabilnością rury magnetycznej. Niestabilność ma wynikać ze skręcenia pola mag. wokół osi rury. Po zatrzymaniu erupcji, w położeniu wskazanym strzałką, zaobserwowano emisję promieniowania HXR (źródło S2), która może wskazywać na utworzenie się warstwy prądowej w miejscu styku pól magnetycznych dwóch odcinków rury magnetycznej. (obserwacje: TRACE) [Alexander et al. 2006, Hassanin & Kliem 2016]