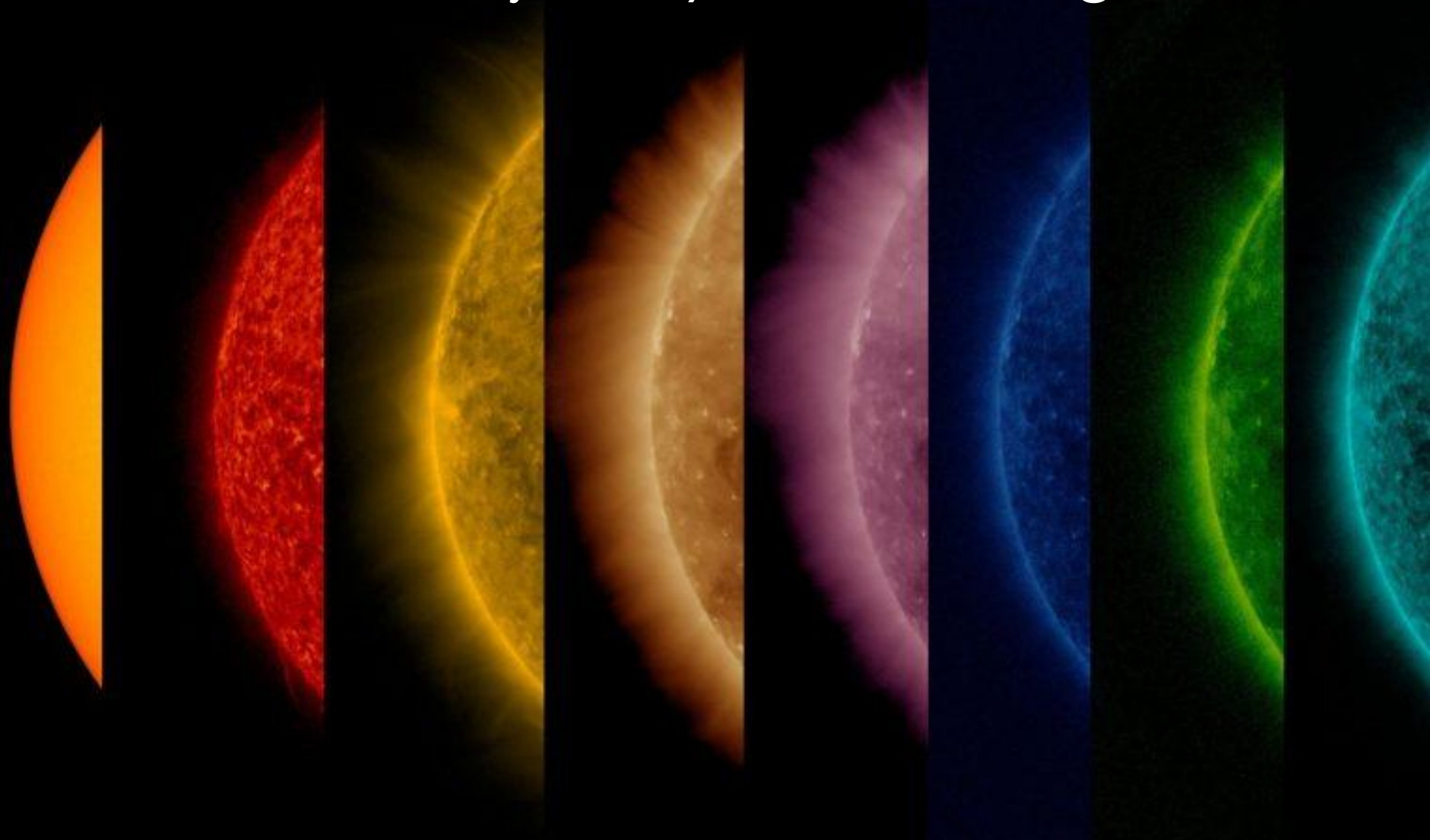


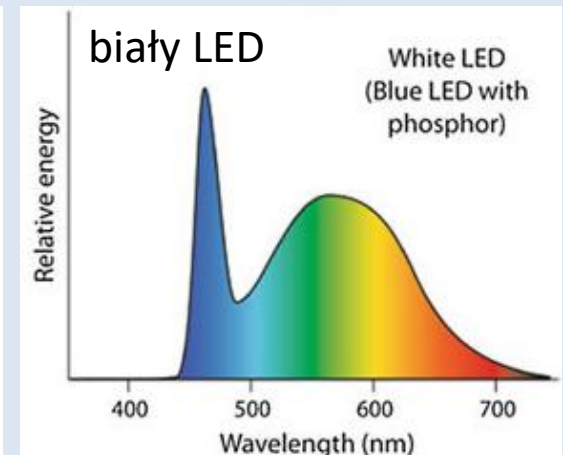
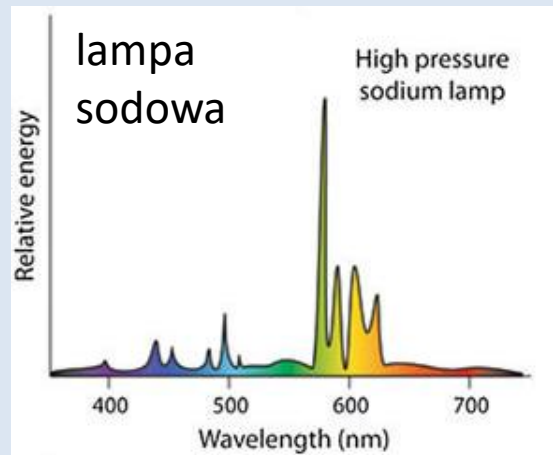
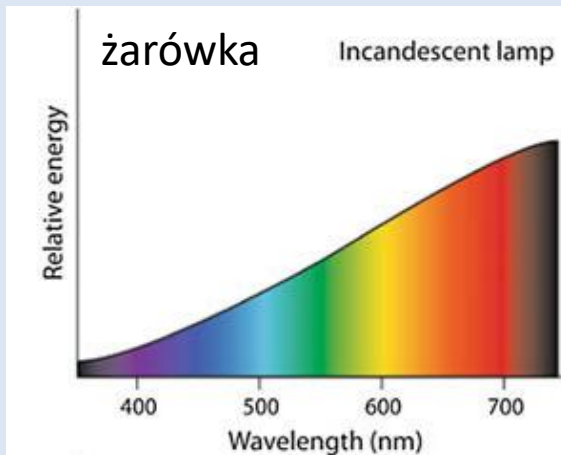
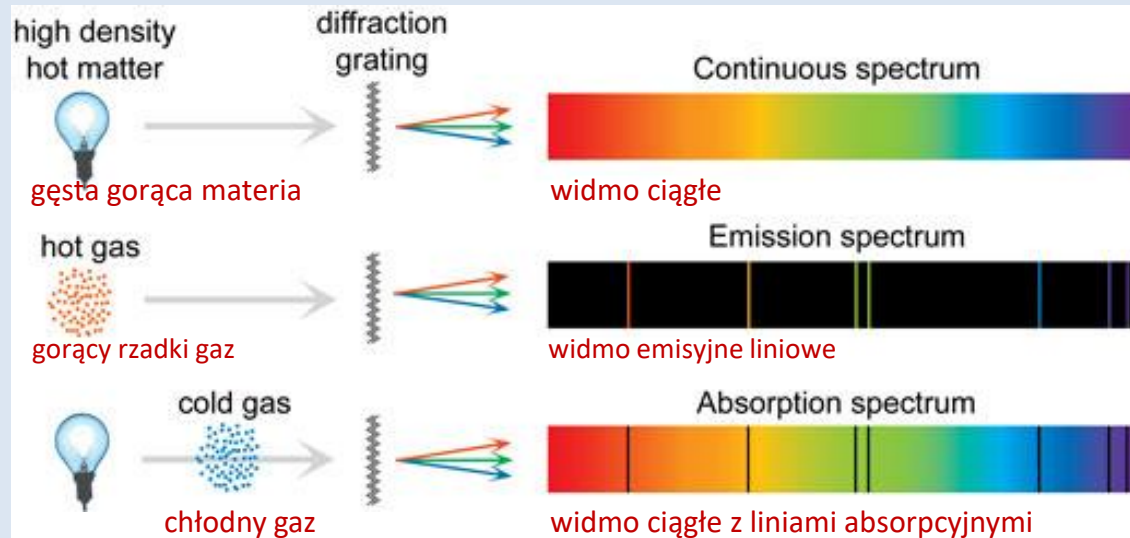
widmo emisji w wysokich energiach



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

widmo fal elektromagnetycznych

- wygląd widma: widmo ciągłe, liniowe (dyskretne), absorpcyjne, emisyjne

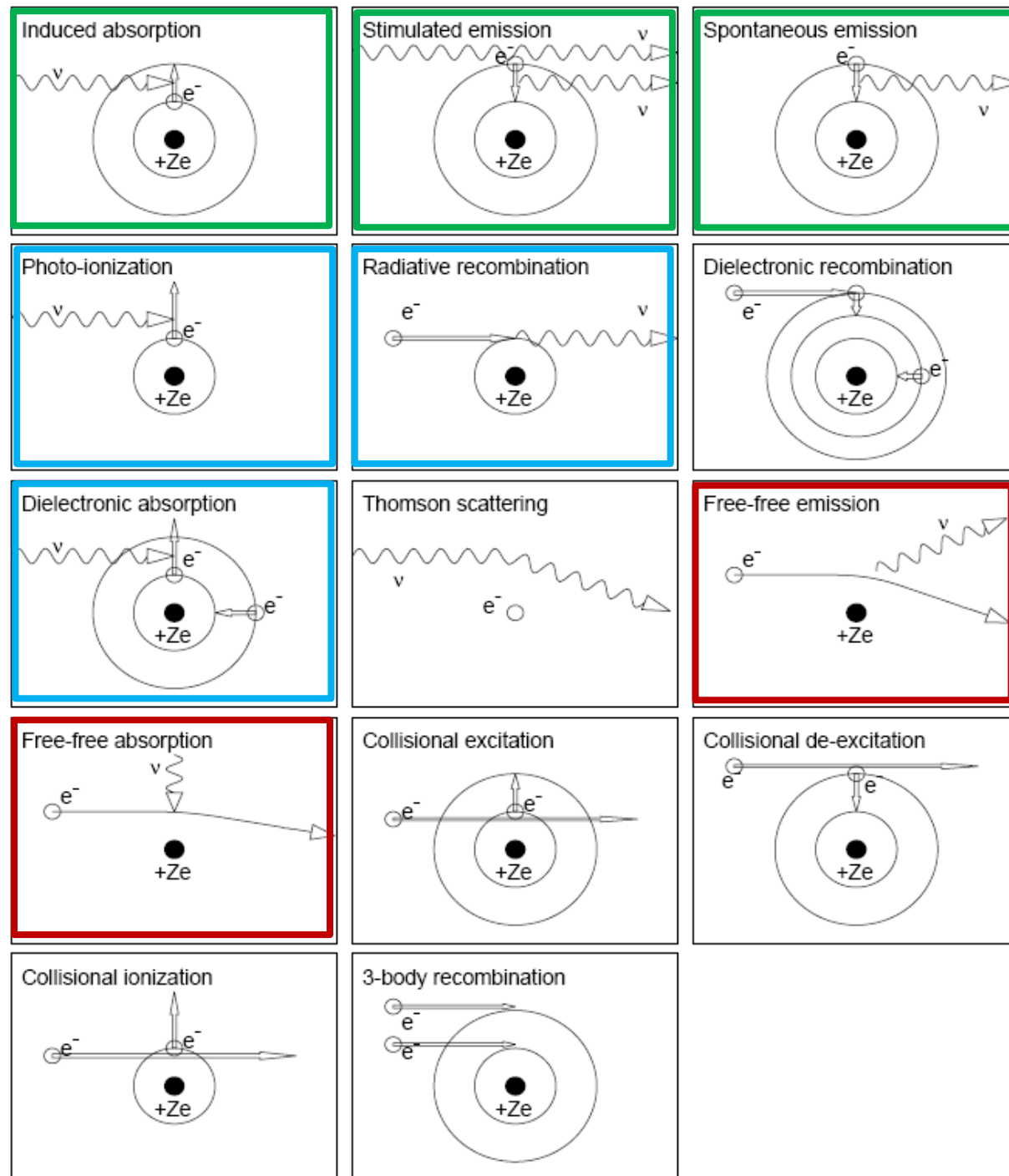


widmo, linie widmowe

Foton może być pochłonięty przez elektron (absorpcja) lub elektron może wyemitować foton (emisja).

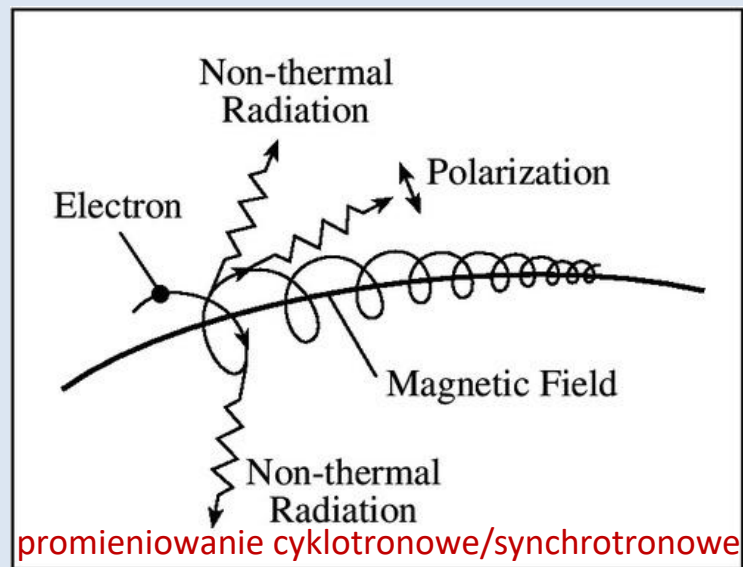
Charakter widma zależy od tego, czy elektron jest związany z atomem czy nie (jest wolny):

- **wolny-wolny** (free-free, ff) – **widmo ciągłe**
- **wolny-związany** (free-bound, fb) – **widmo ciągłe**
- **związany-związany** (bound-bound, bb) – **widmo liniowe**



widmo fal elektromagnetycznych

- mechanizm emisji: emisja termiczna (thermal), nietermiczna (non-thermal)

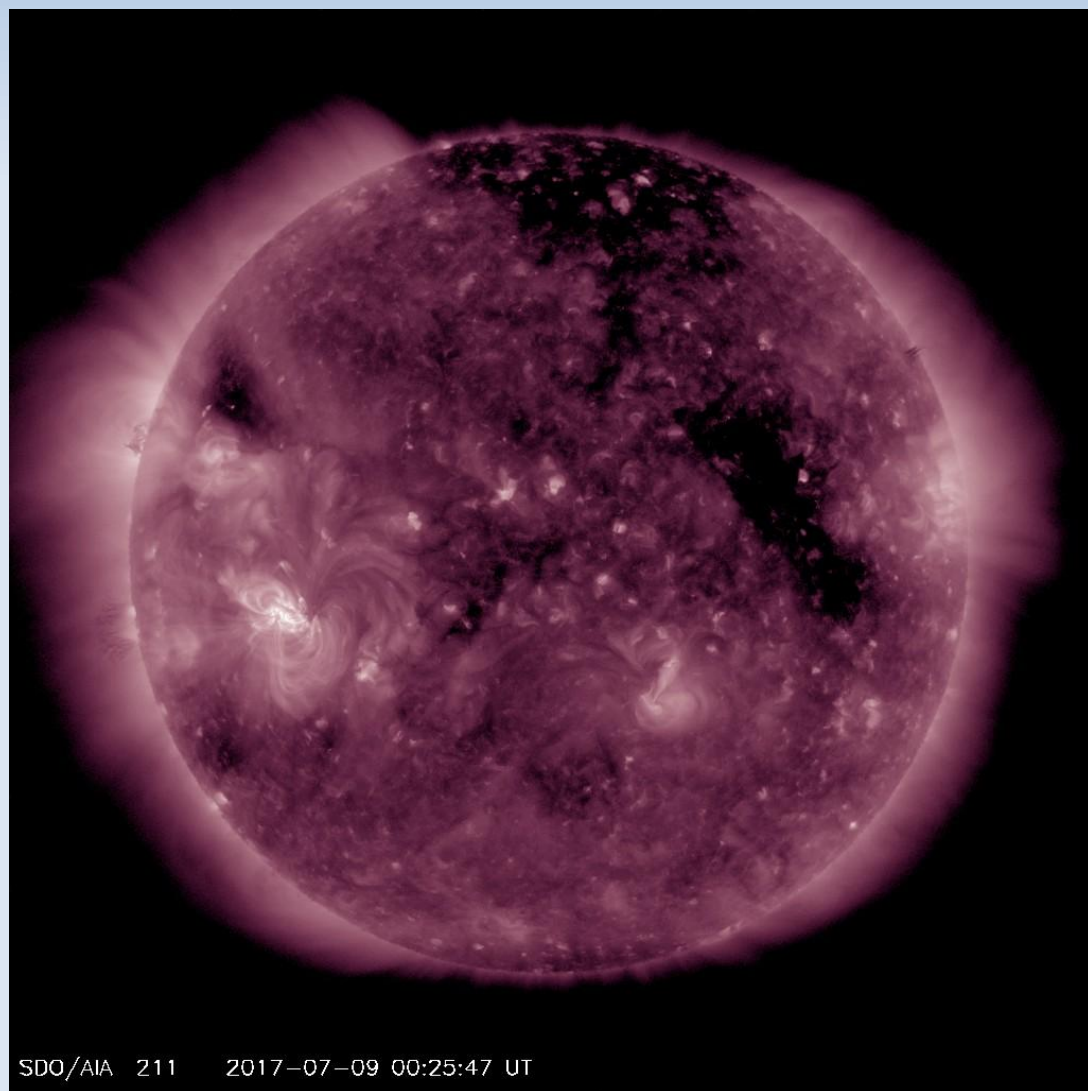


Lokalizacja emisja w wysokich energiach:

- emisja pochodzi ze wszystkich obszarów atmosfery
- obejmuje obszary o różnym skalach przestrzennych i czasowych, jasności, temperaturze, dynamice
- im wyższa energia emisji, tym mniej obszarów emisji (czasowo i przestrzenie)

Przykładowe obszary emisji:

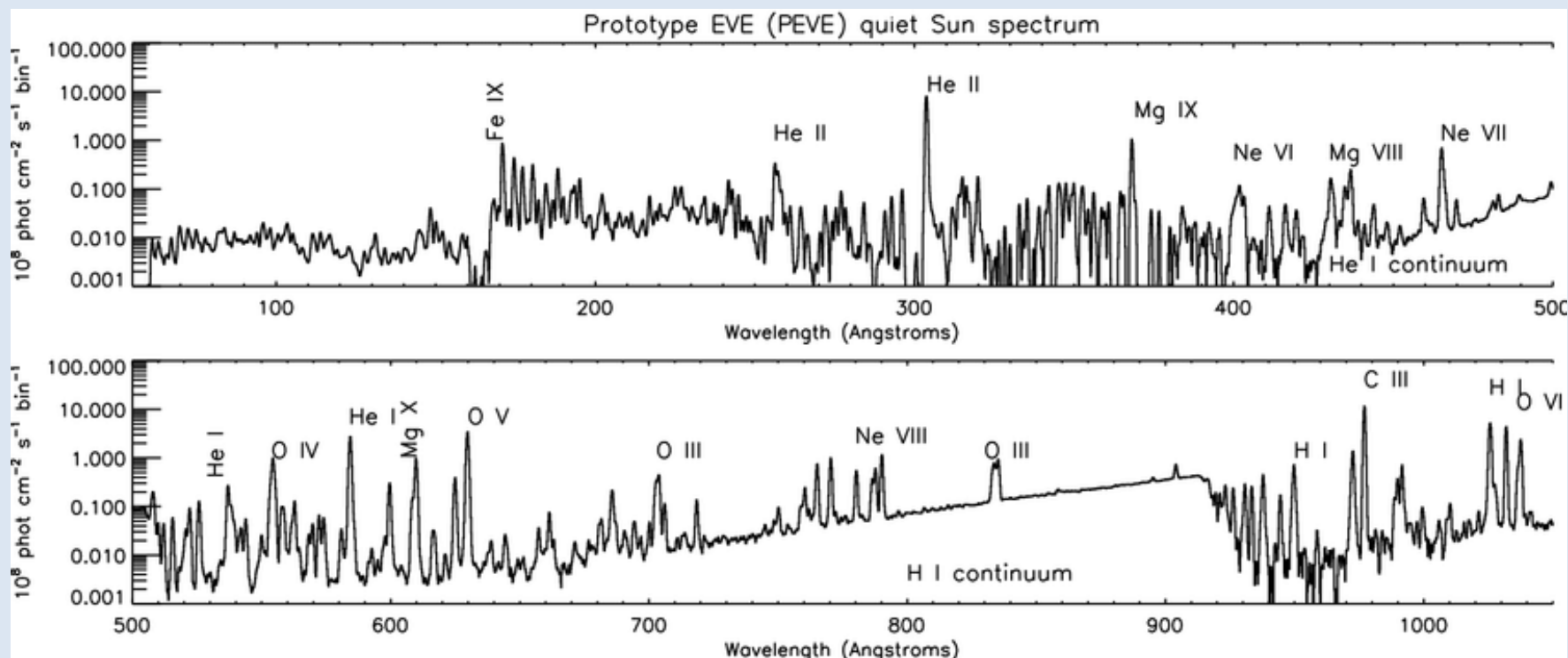
- korona spokojna (emisja dyfuzyjna, większość korony)
- jasne punkty (małe obszary podwyższonej jasności)
- obszary aktywne (duża liczba struktur pętlowych)
- dziury koronalne (obszary ciemne, struktura magnetyczna otwarta)
- zjawiska dynamiczne, np. rozbłyski



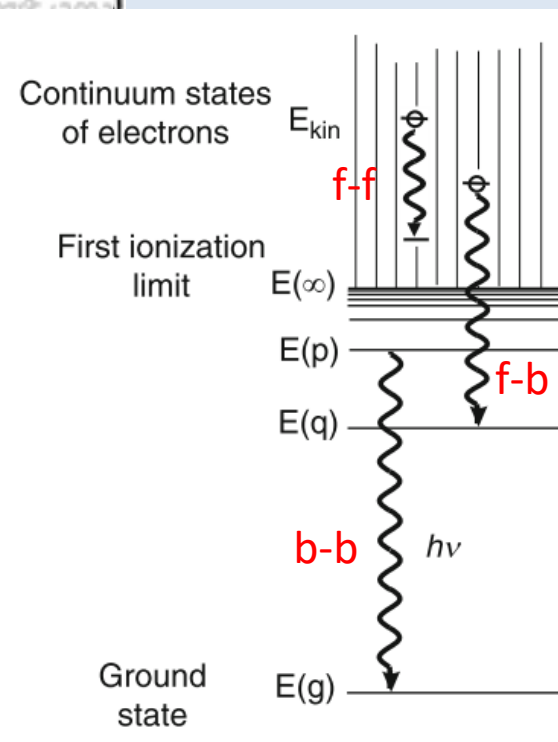
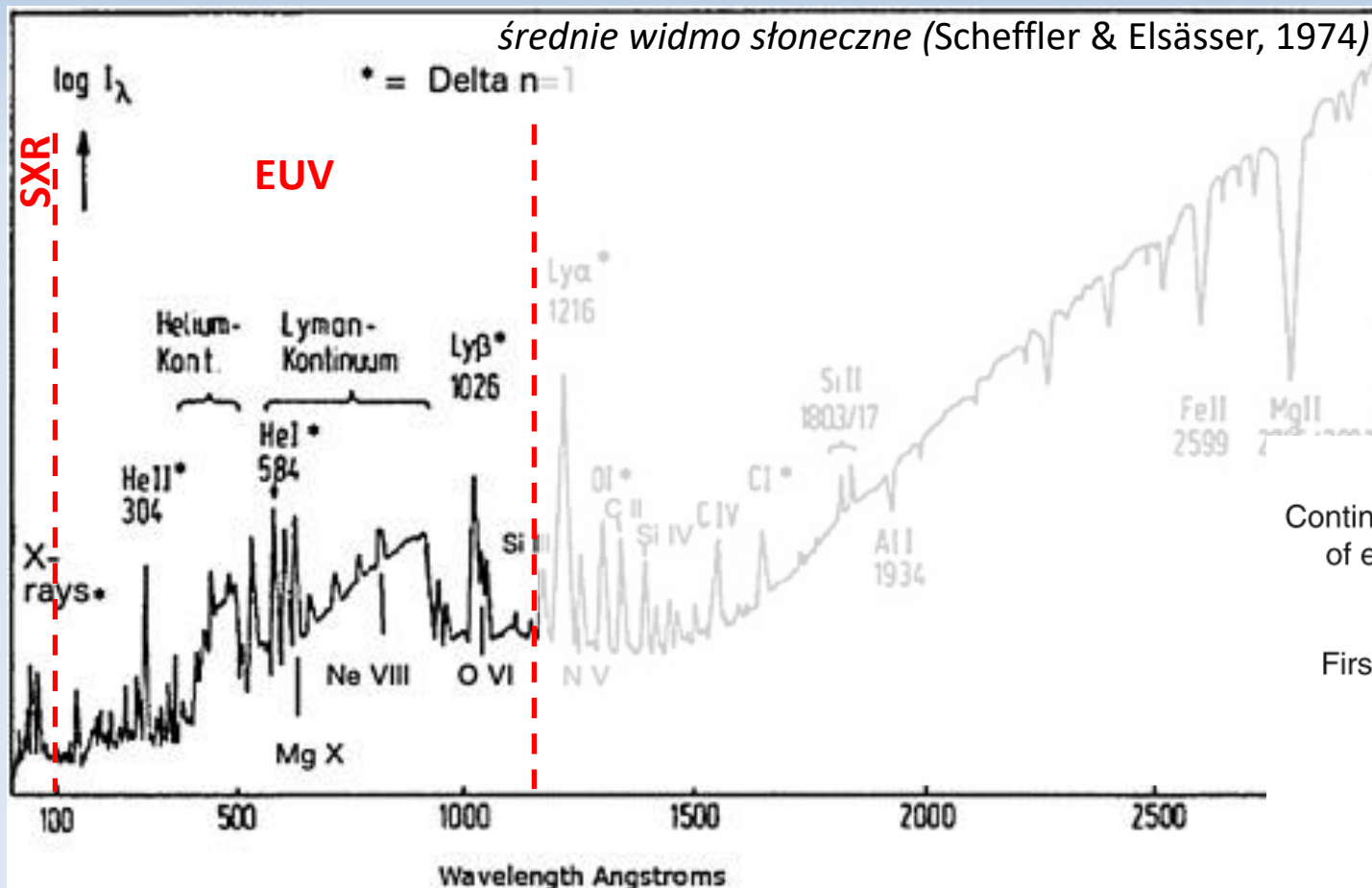
Widmo słoneczne w zakresie wysokich energii:

- duża liczba wąskich linii emisyjnych (różne pierwiastki, różne stopnie jonizacji)
- widmo ciągłe (dominuje w wyższych energiach, >10 keV)
- w większości emisja cienka optycznie

Obserwacje w tym zakresie umożliwiają wyznaczenie (obrazowanie, spektroskopia): ruchy plazmy, turbulencja, propagacja fal, procesy nierównowagowe, diagnostyka plazmy (temperatura, gęstość), różniczkowa miara emisji, obfitości pierwiastków (względne, bezwzględne, FIP), cechy mechanizmów przyspieszania cząstek



średnie widmo słoneczne (Scheffler & Elsässer, 1974)



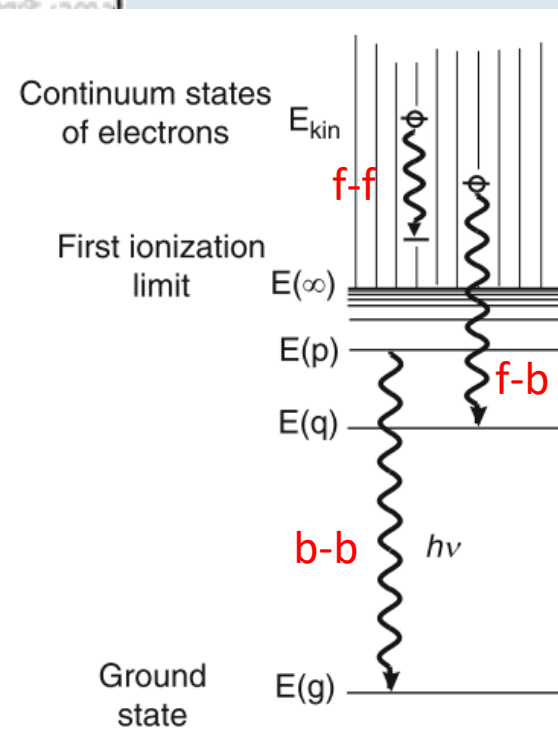
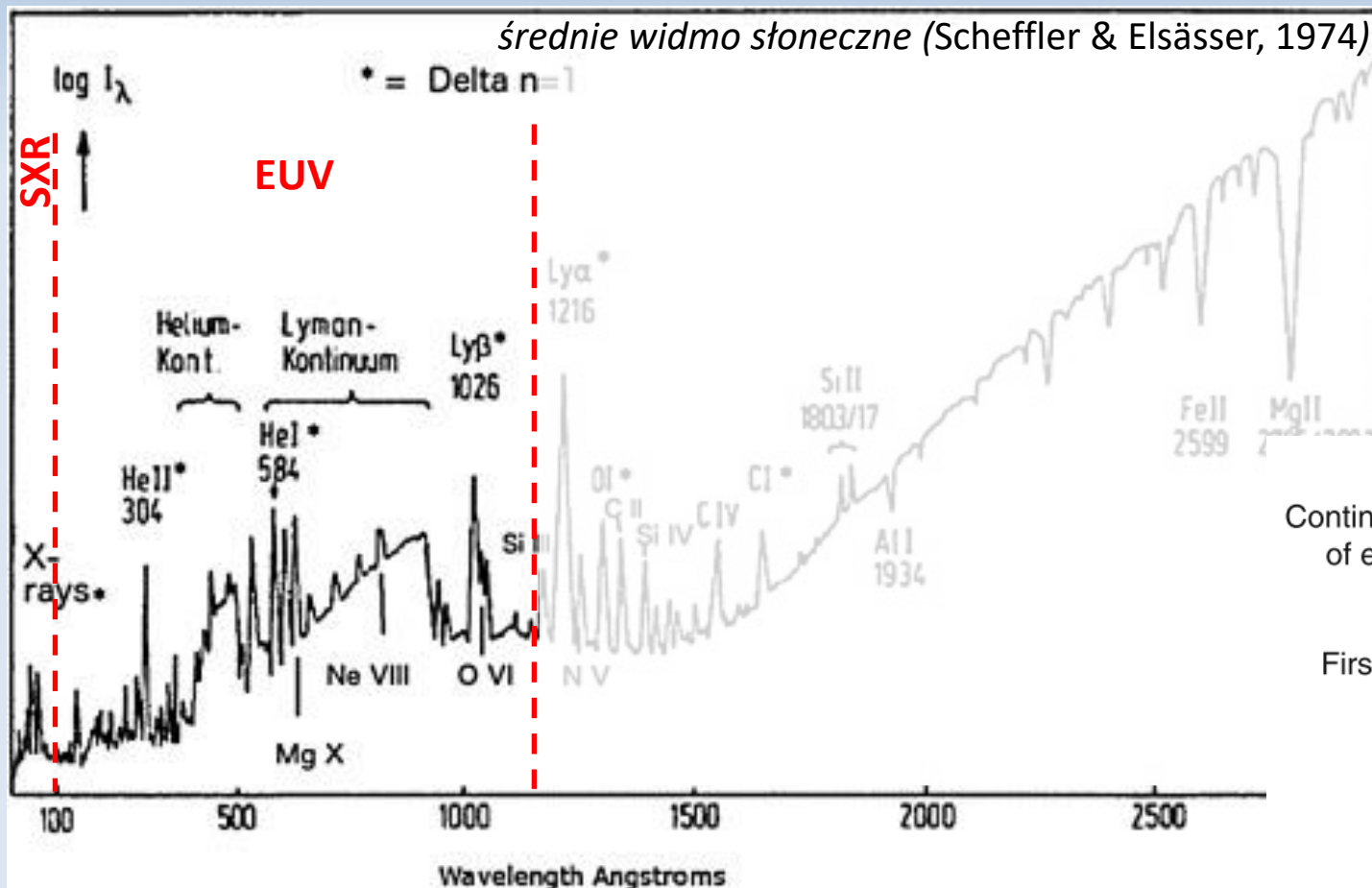
Procesy odpowiedzialne za formowanie widma:

- linie emisyjne: przejścia b-b

$$h\nu_{pq} = E(p) - E(q)$$

linie obecne w widmie dla $E < 10 \text{ keV}$ ($\lambda > 1.24 \text{ \AA}$)

średnie widmo słoneczne (Scheffler & Elsässer, 1974)



Procesy odpowiedzialne za formowanie widma:

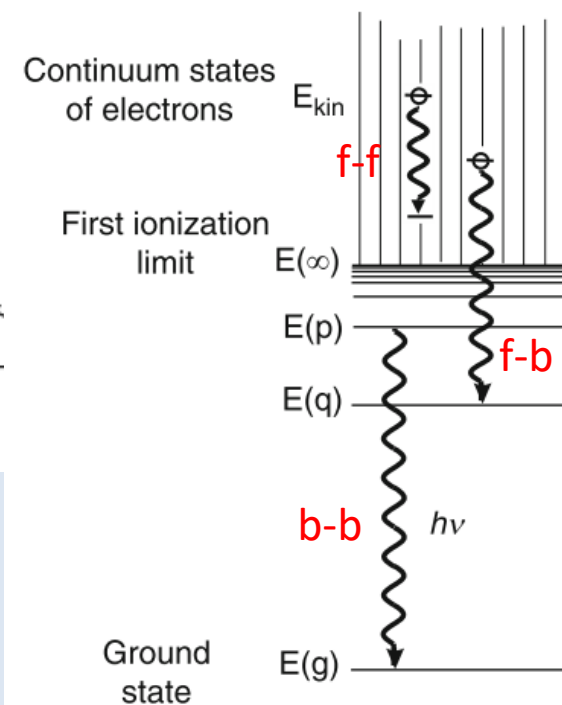
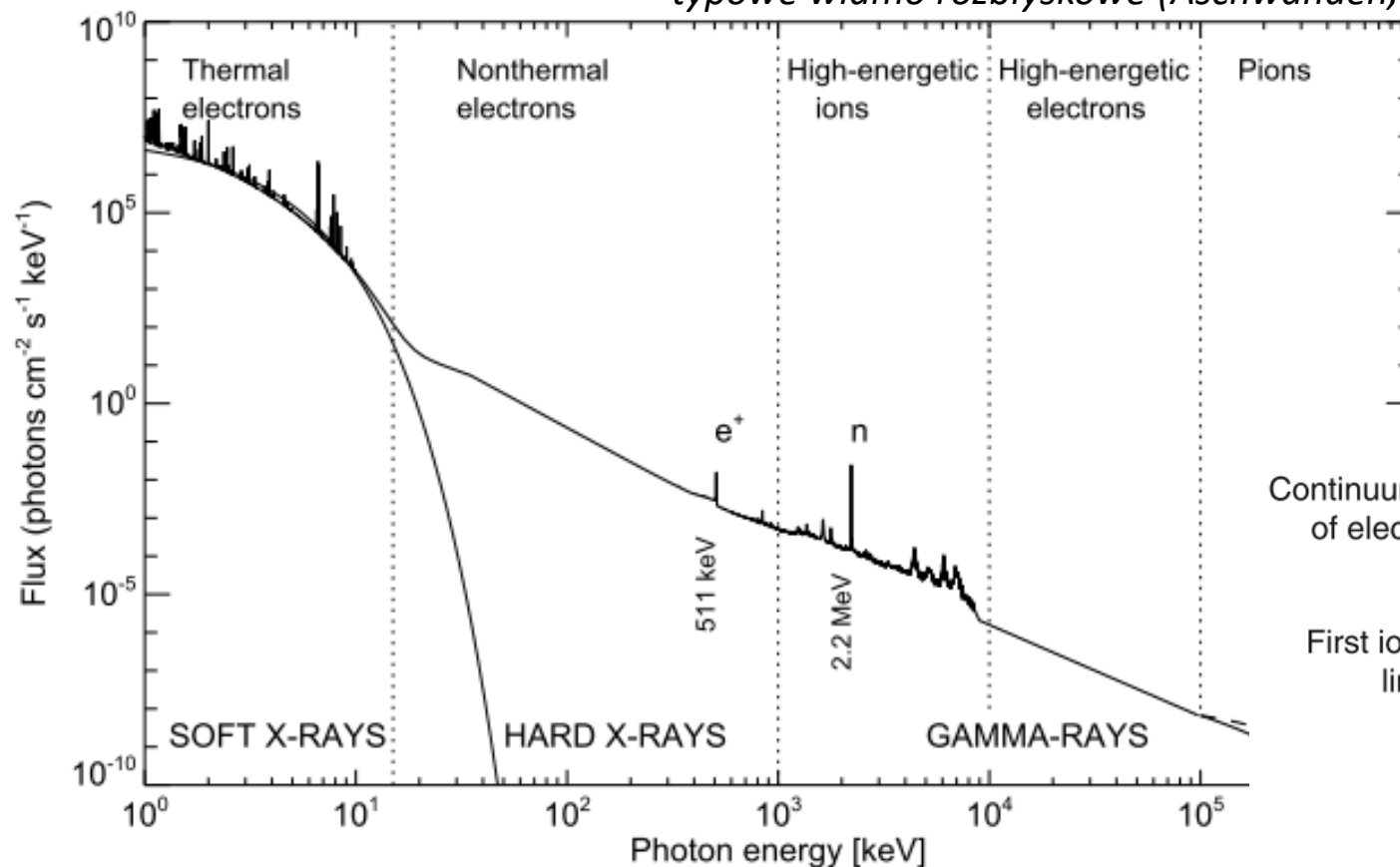
- widmo ciągłe: przejścia f-b (skoki rekombinacyjne)

$$h\nu = E_{kin} + [E(\infty) - E(q)]$$

oraz przejścia f-f (funkcja gładka)

$$h\nu = E_{kin1} - E_{kin2}$$

typowe widmo rozbłyiskowe (Aschwanden, 2005)



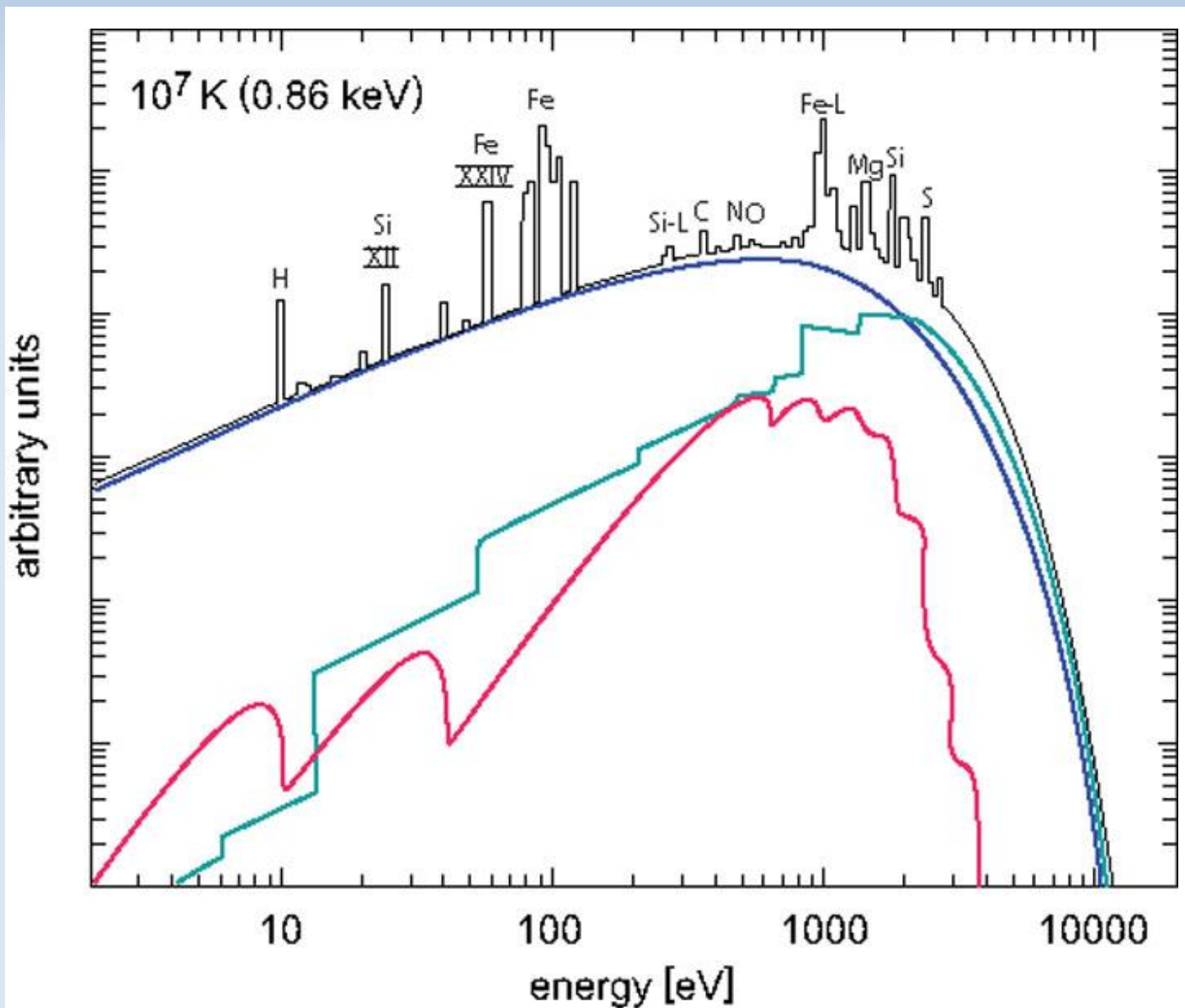
Procesy odpowiedzialne za formowanie widma:

- widmo ciągłe: przejścia f-b (skoki rekombinacyjne)

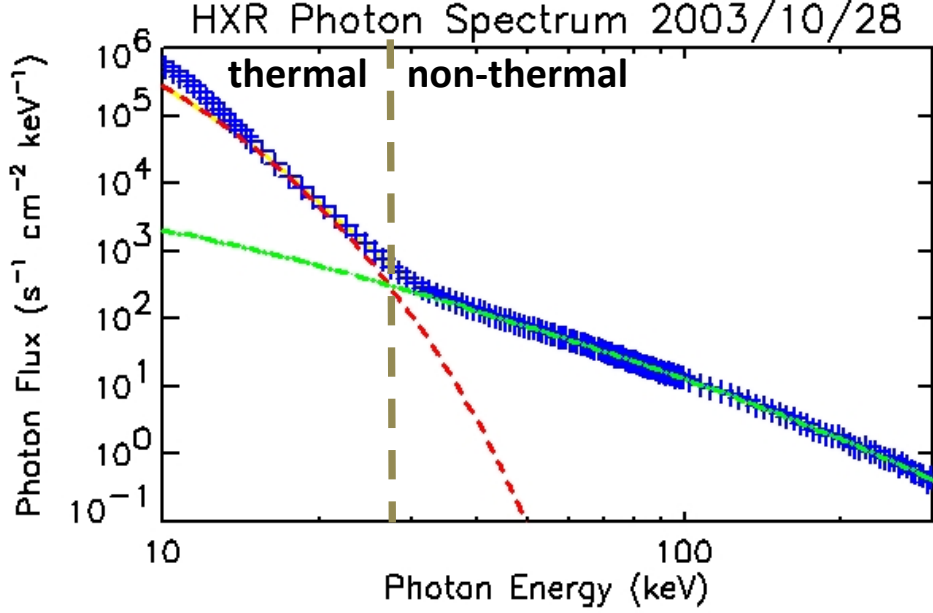
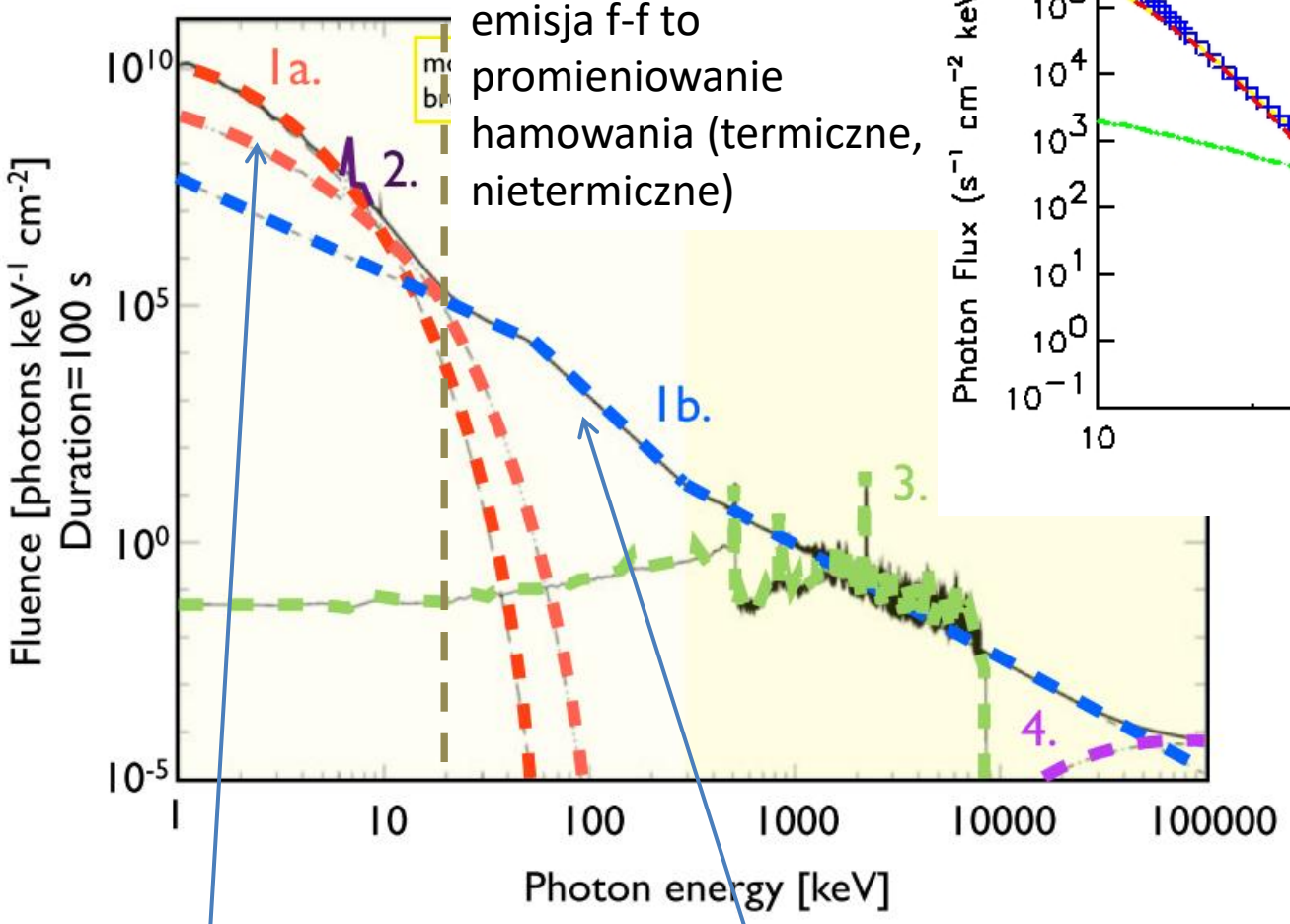
$$h\nu = E_{kin} + [E(\infty) - E(q)]$$

oraz przejścia f-f (funkcja gładka)

$$h\nu = E_{kin1} - E_{kin2}$$

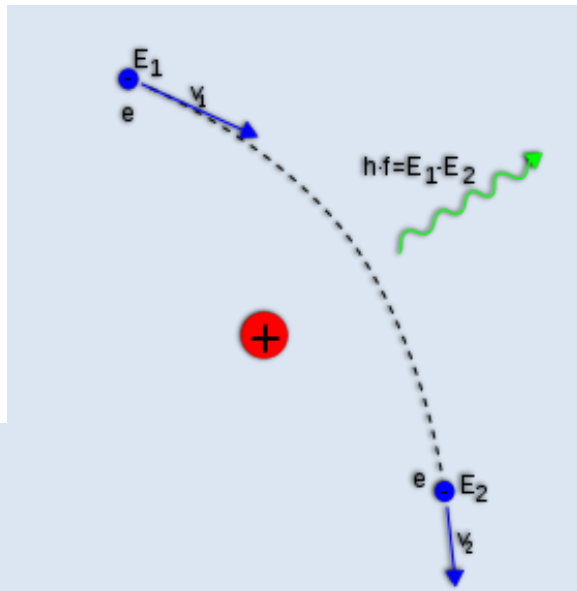


Względny wkład f - f (niebieski) i f - b (zielony) do widma ciągłego zależy m.in. od temperatury. Im wyższa T , tym większy wkład f - f .

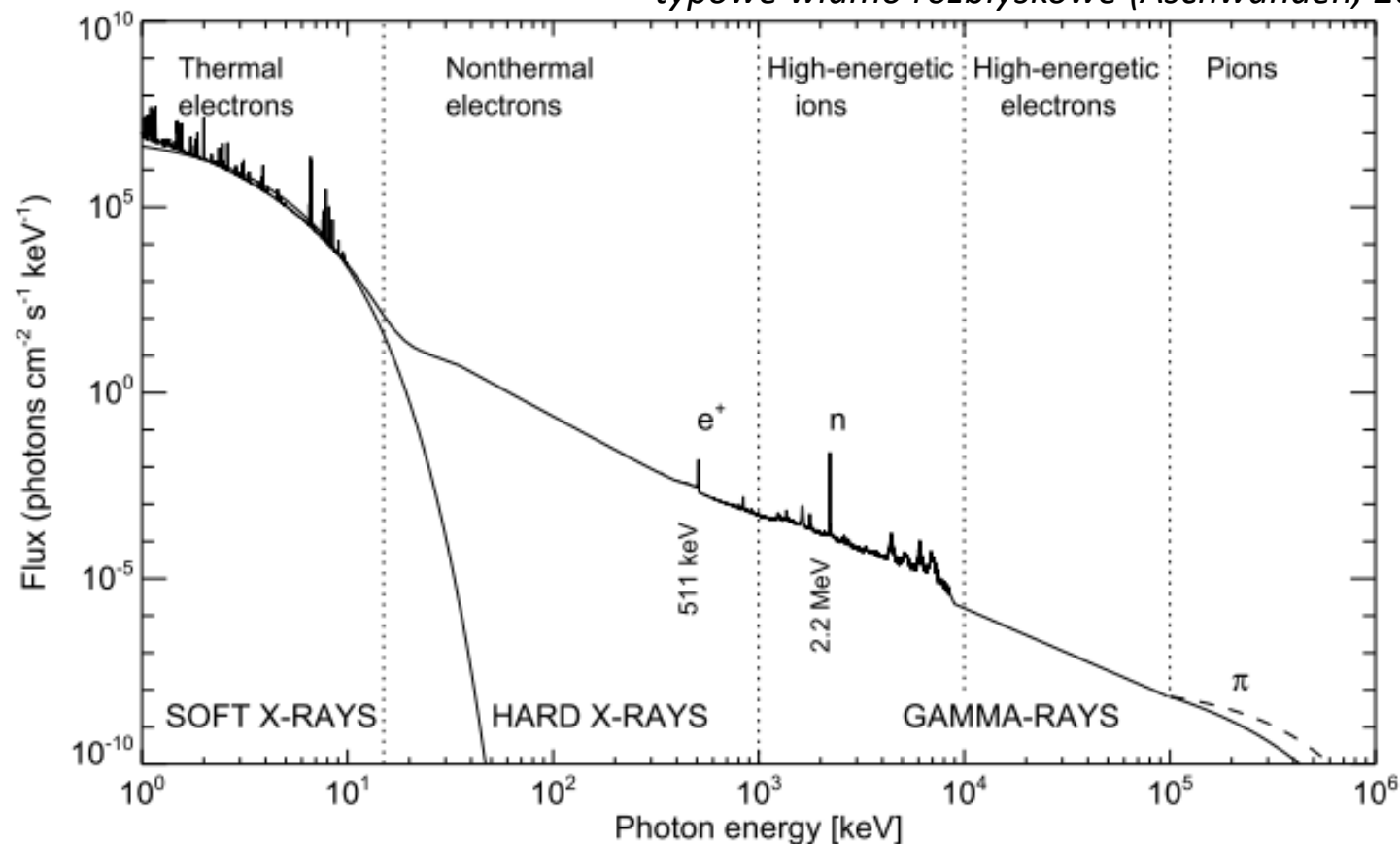


promieniowanie termiczne
(thermal)
do około 20 keV
źródło: elektrony termiczne
(gorąca plazma)
przebieg eksponencjalny

promieniowanie nietermiczne
(non-thermal)
od około 20 keV
źródło: elektrony nietermiczne
(przyspieszone)
przebieg potęgowy



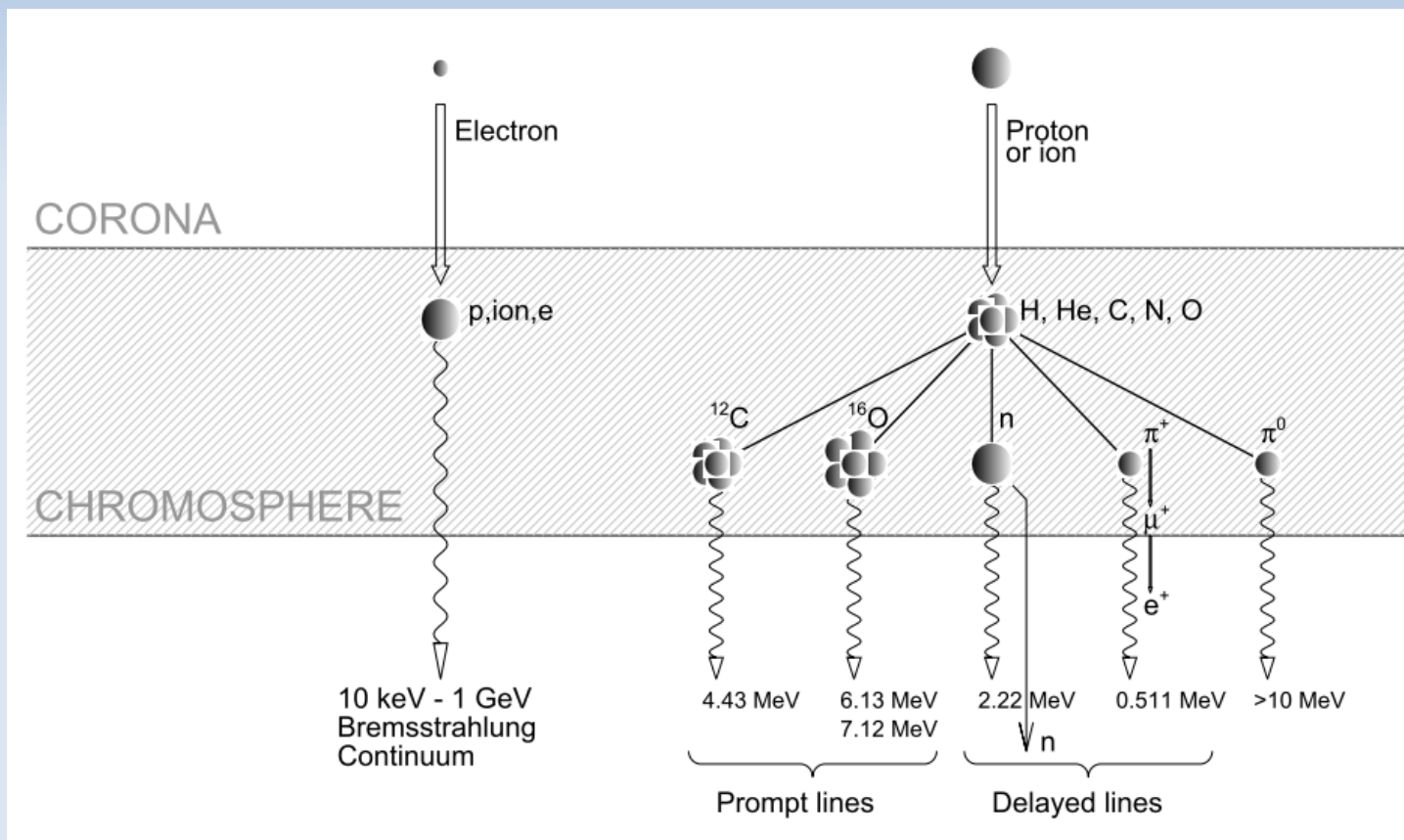
Bremsstrahlung
promieniowanie hamowania
(widmo ciągłe, kontinuum)

typowe widmo rozbłyiskowe (Aschwanden, 2005)

Procesy odpowiedzialne za formowanie widma:

- linie emisyjne de-ekscytacji jądrowej, wychwytu neutronu, anihilacji pozytronu
- widmo ciągłe rozpadu pionów (mezonów π)

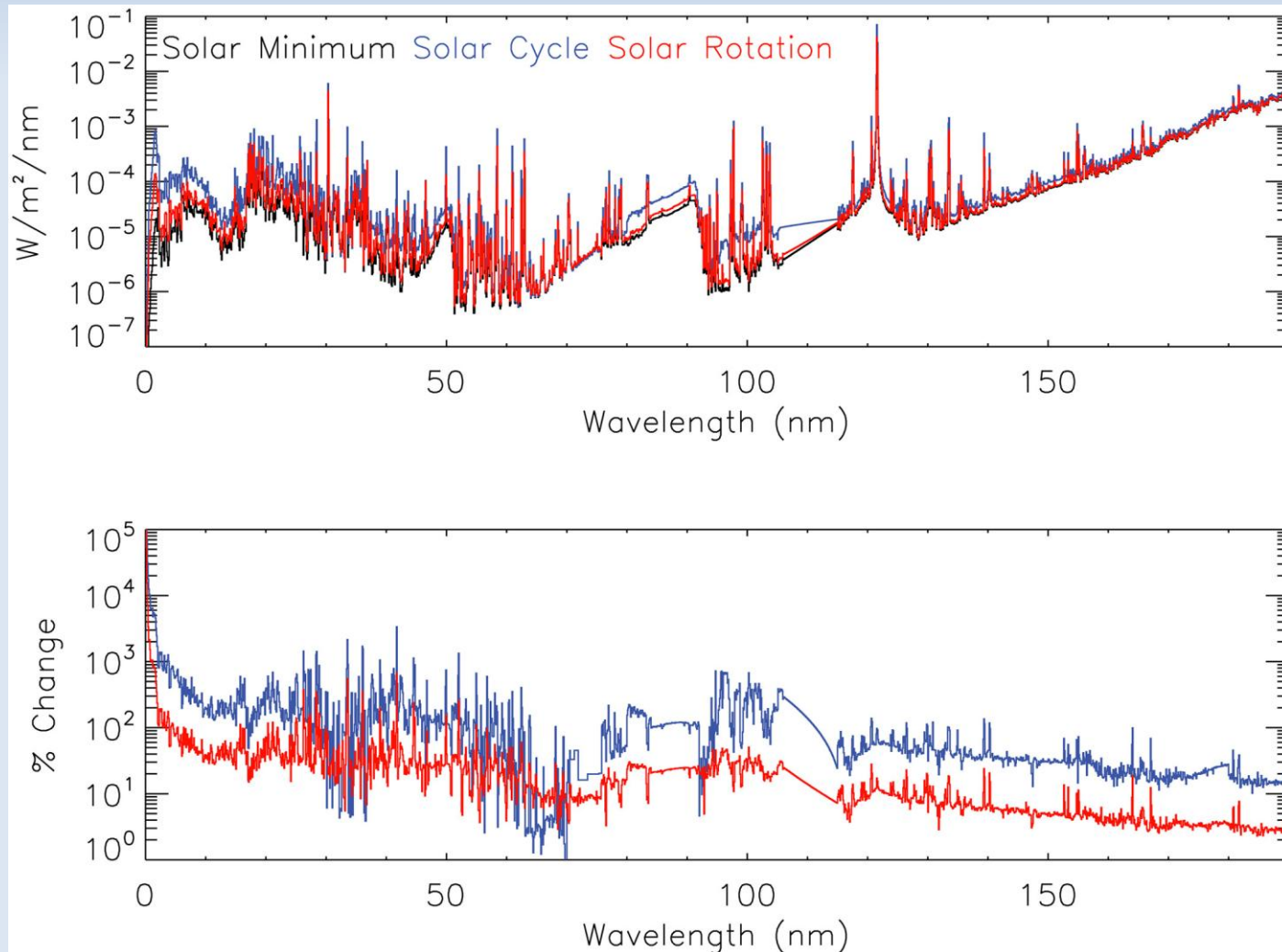
Schematyczne
przedstawienie
mechanizmów emisji w
najwyższych energiach
(XR, γ)
[Aschwanden, 2005]



Szczegóły:

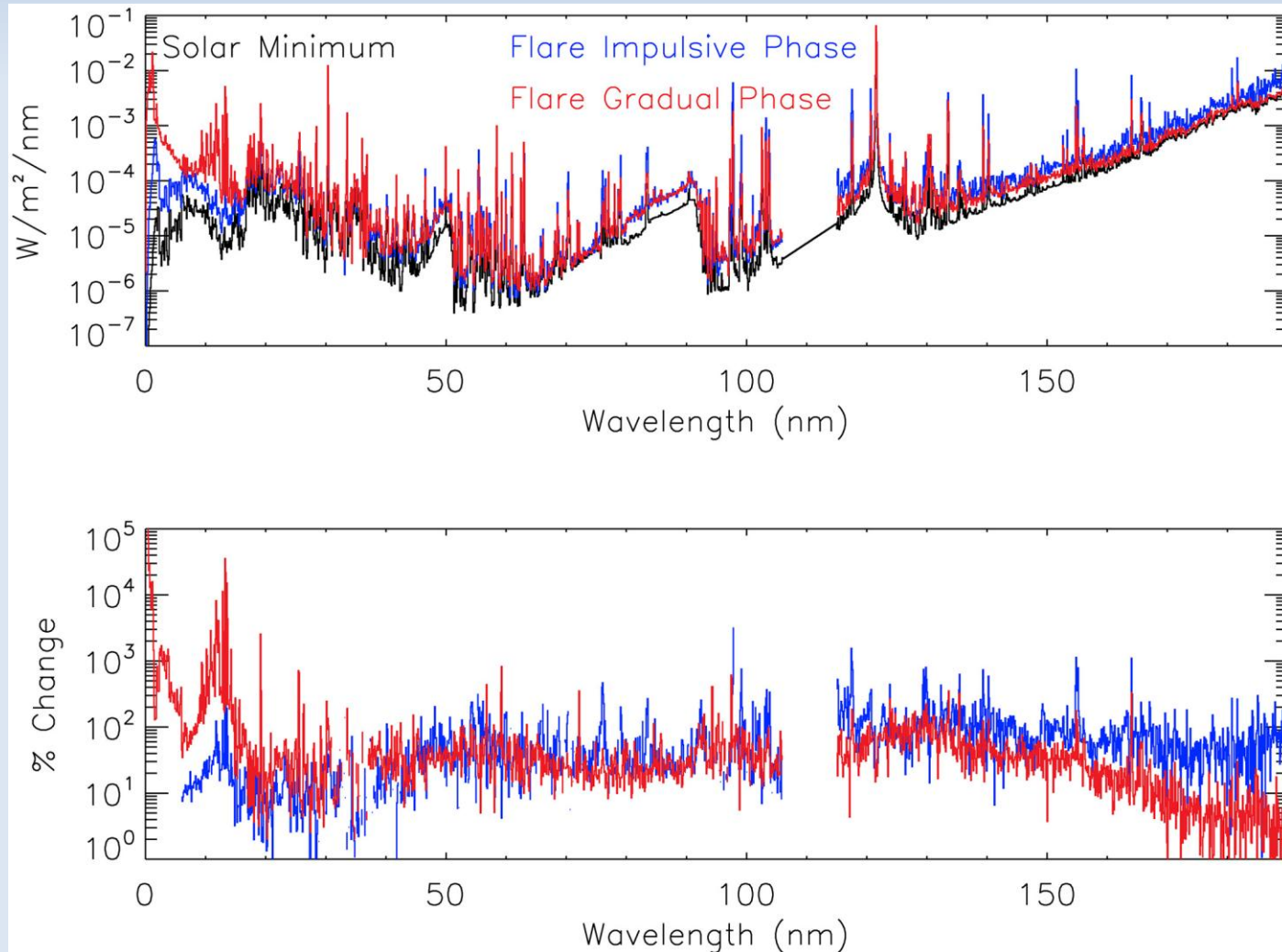
- linie emisyjne de-ekscytacji jądrowej: zderzenia przyspieszonych jonów z materią gęstszą (chromosfera), np. $^{12}\text{C}(p,p')^{12}\text{C}^*$ (4.43 MeV), $^4\text{He}(\alpha,n)^7\text{Be}^*$ (0.429 MeV)
- wychwyt neutronu: $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ (2.223 MeV)
- anihilacji pozytronu: $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ (0.511 MeV)
- widmo ciągłe rozpadu pionów (mezonów π)

Widmo ulega znacznym zmianom w zależności od poziomu aktywności.



Widmo modelowe dla minimum aktywności (referencyjne) oraz uśrednione po cyklu aktywności i rotacji [Chamberlin et al. 2020]

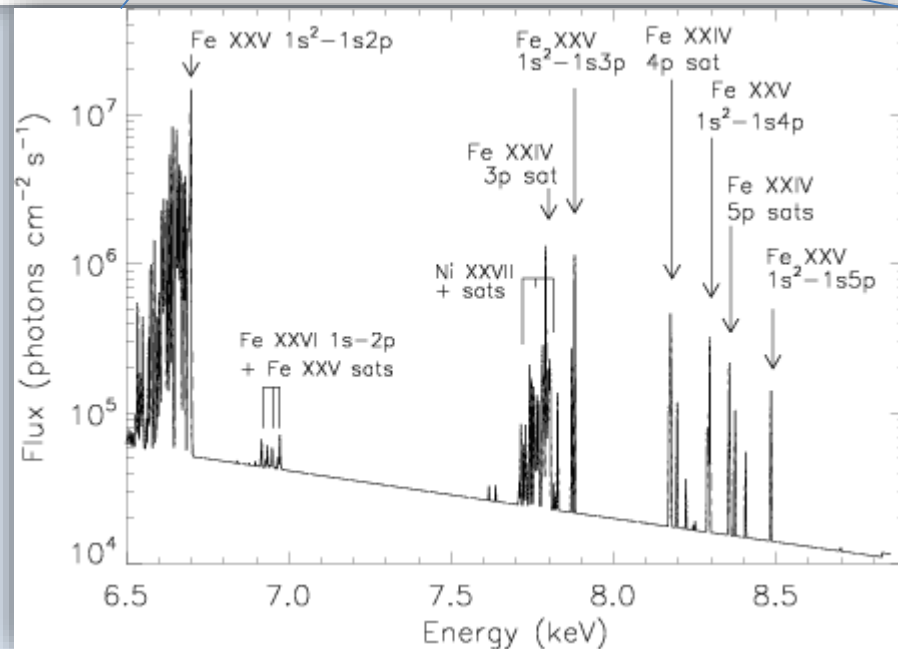
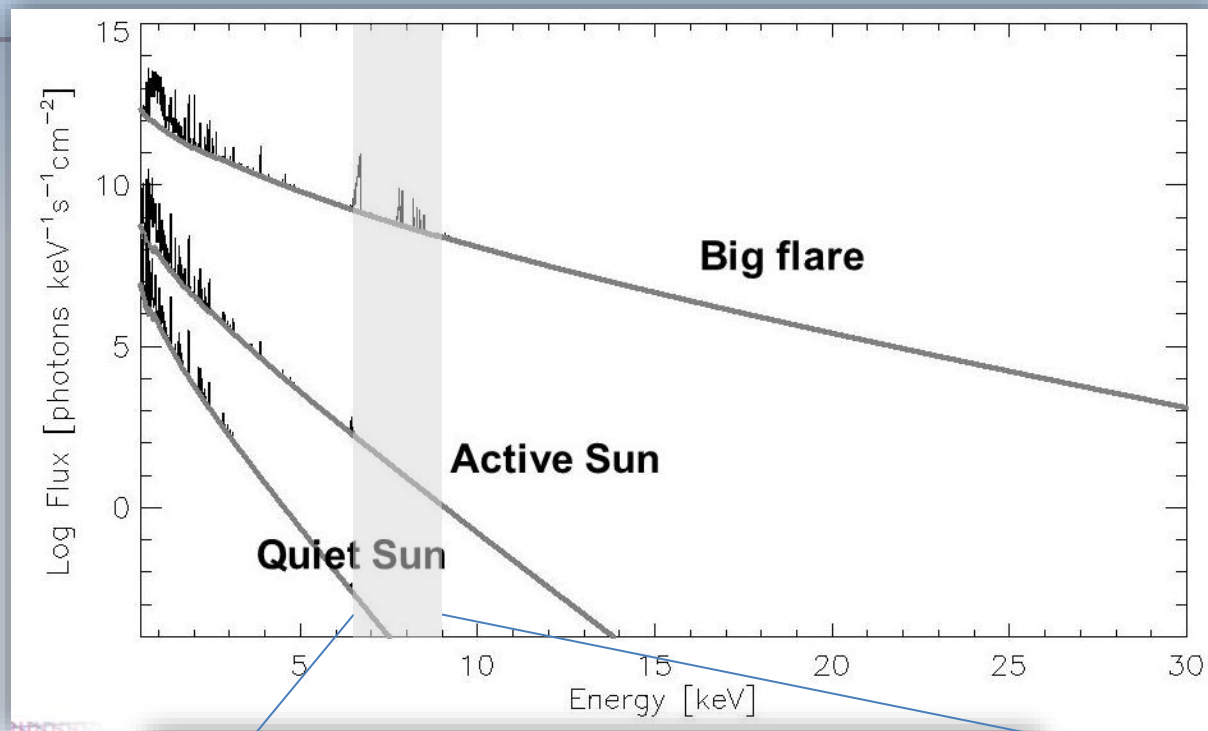
Widmo ulega znacznym zmianom w zależności od poziomu aktywności.



Widmo modelowe dla fazy impulsowej i gradualnej rozbłysku (28.10.2003) oraz dla minimum aktywności (referencyjne) [Chamberlin et al. 2020]

Widmo ulega znacznym zmianom w zależności od poziomu aktywności.

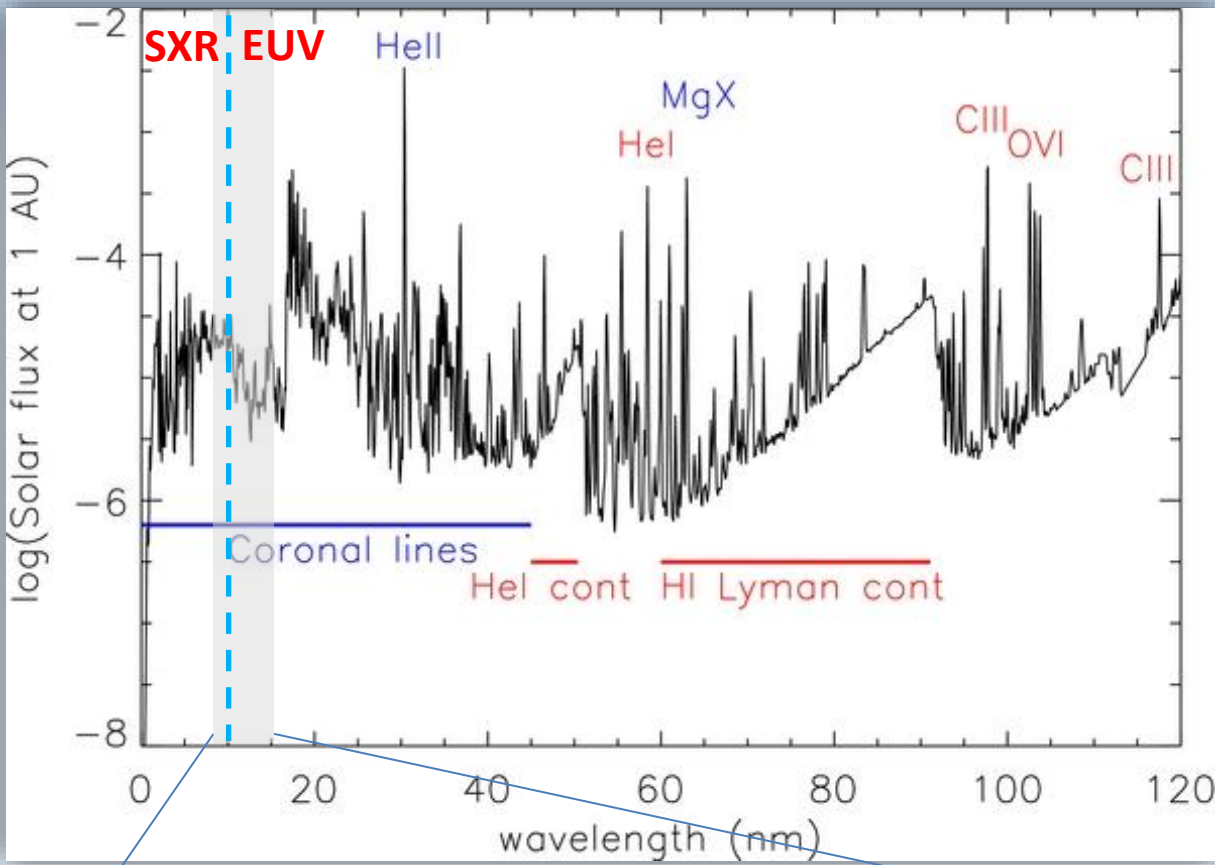
Widmo syntetyczne dla różnych poziomów aktywności



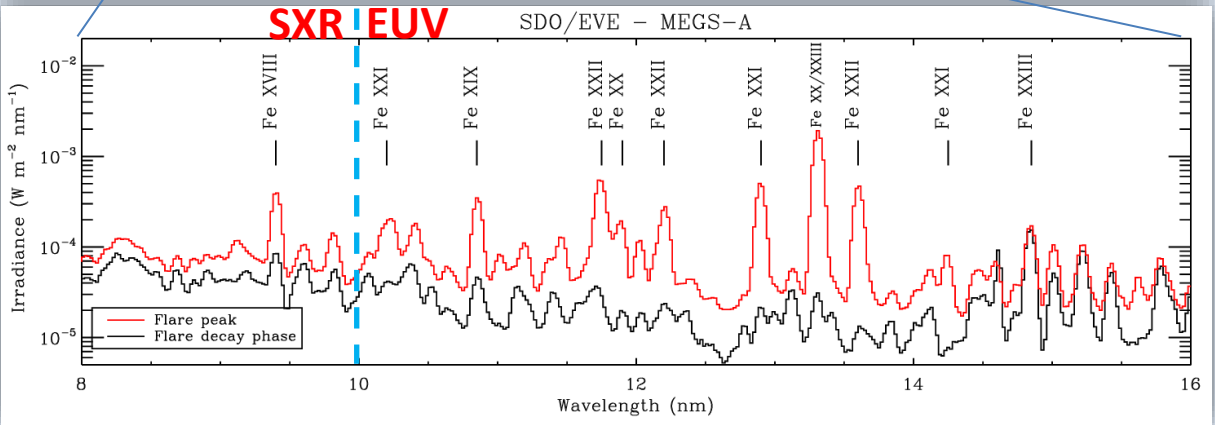
Widmo syntetyczne rozbłyiskowe
w zakresie 6.5 - 9 keV (SXR)
[Phillips, 2008]

Widmo ulega znacznym zmianom w zależności od poziomu aktywności.

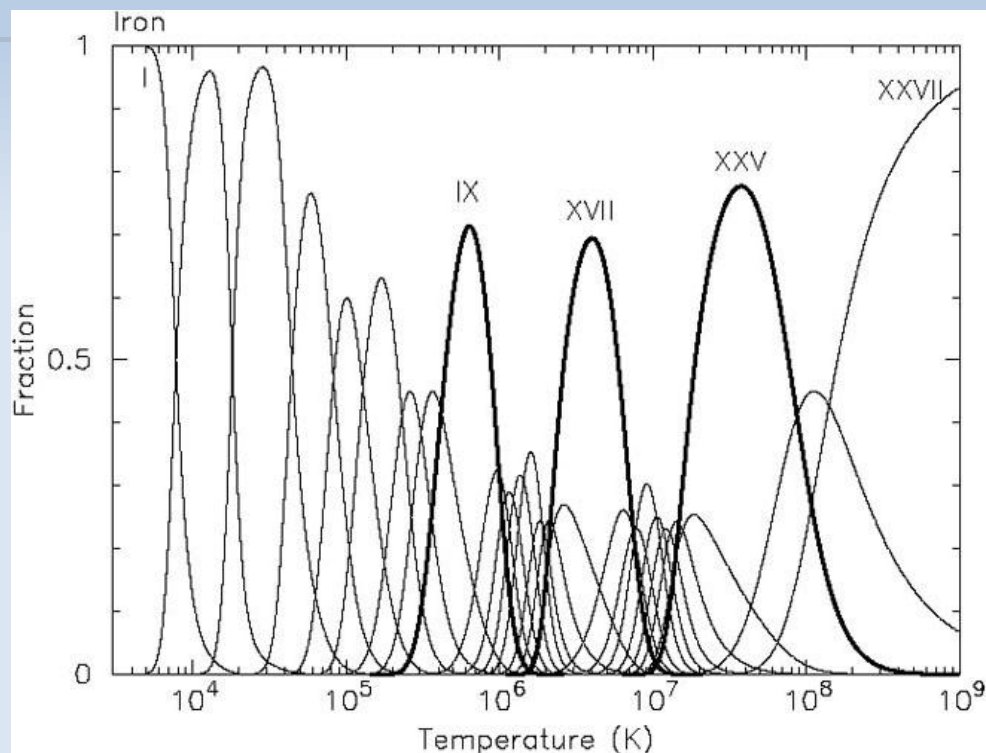
Solar Irradiance Reference Spectrum (SIRS) otrzymane dla minimum aktywności (2008 Mar–Kwi)



Przykładowe widmo słoneczne w zakresie poniżej 8-16 nm dla rozbłyku X6.9, 2011.08.09. W maksimum rozbłyku widoczne są silne linie emisyjne jonów żelaza w wysokim stopniu jonizacji, co świadczy o wysokiej temperaturze plazmy, >10 MK (SDO/EVE)

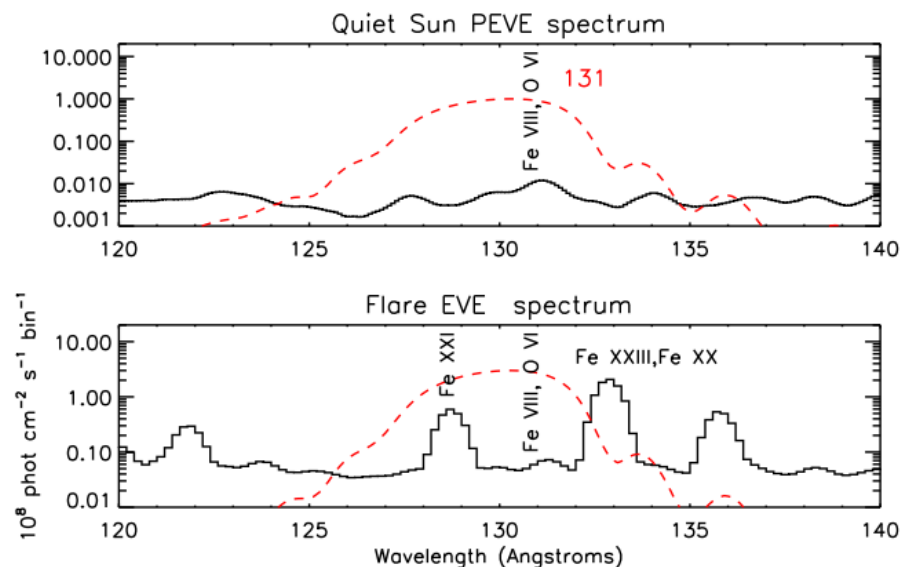
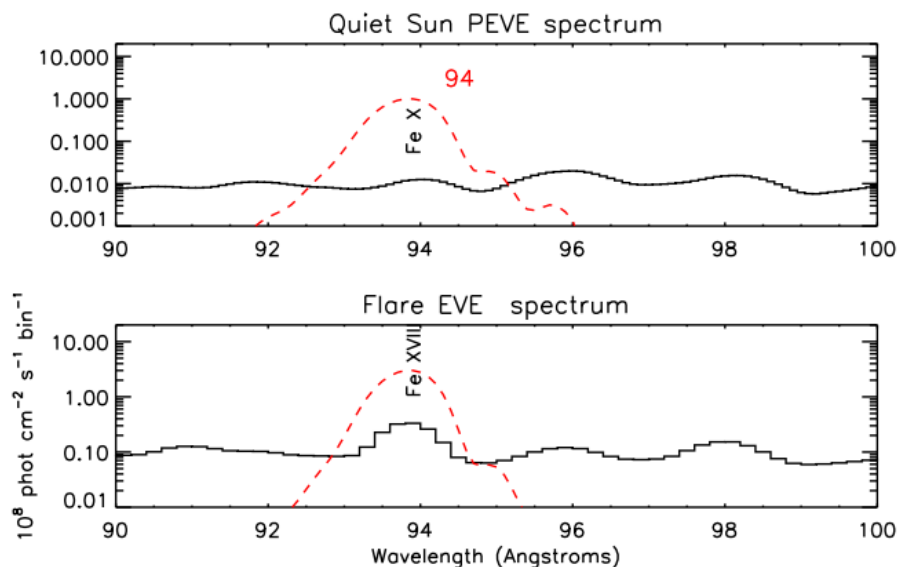


Koncentracja jonów Fe w funkcji temperatury.

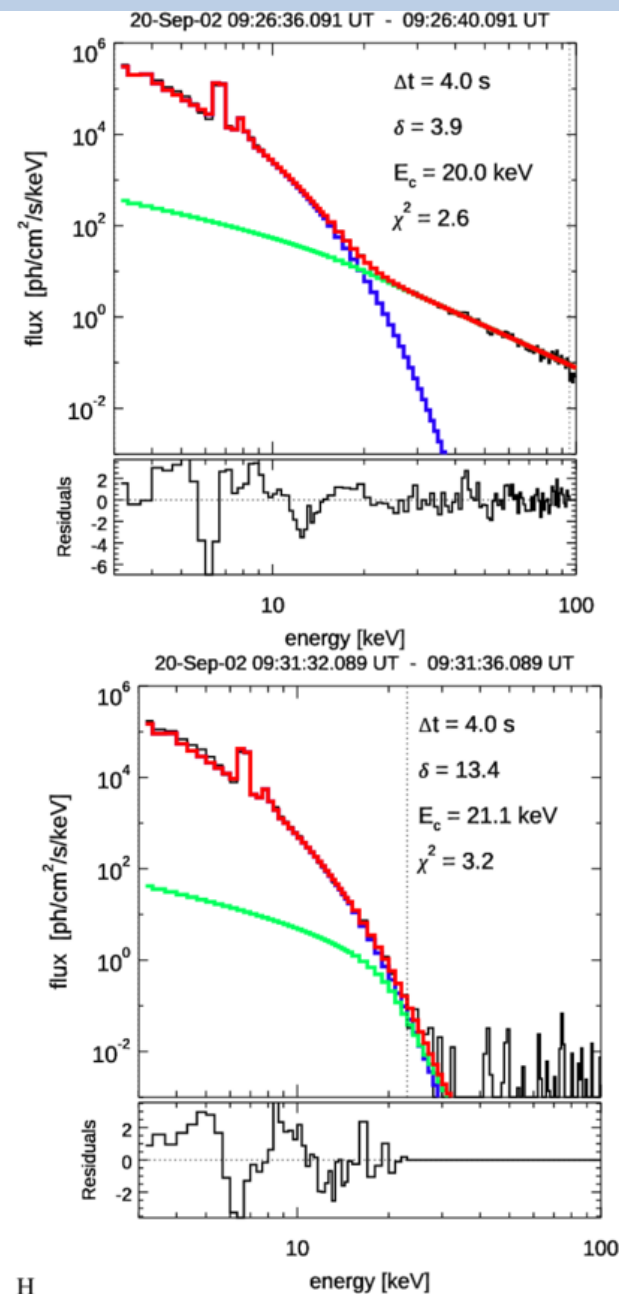
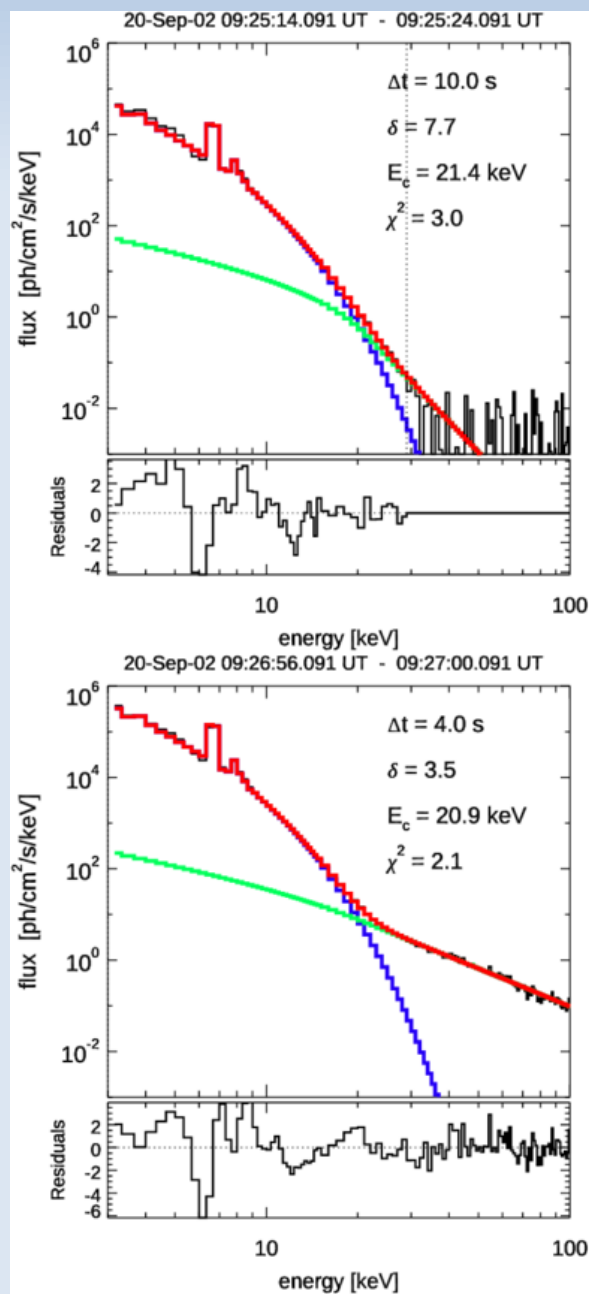


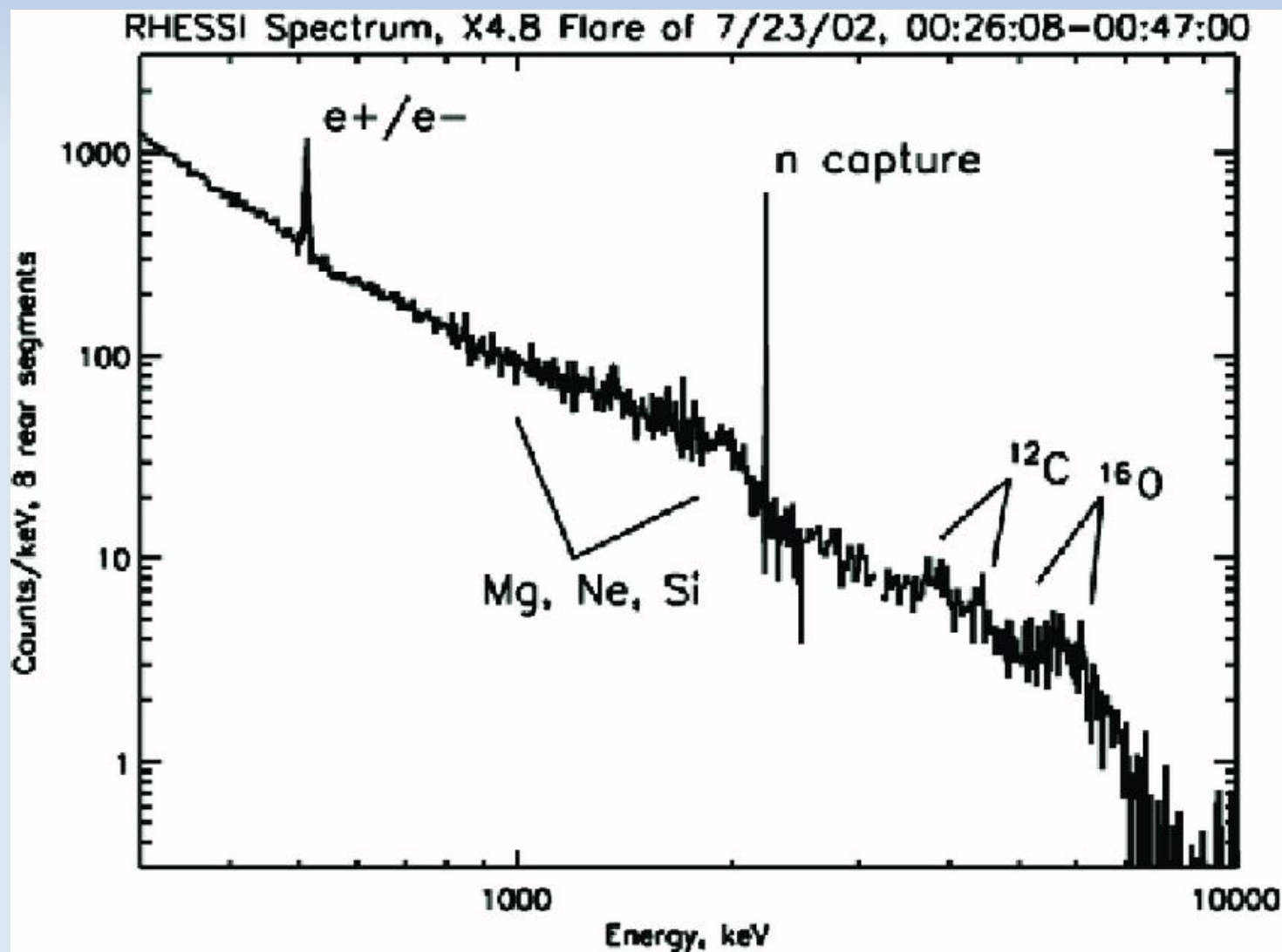
Przykładowe widmo słoneczne spokojne i rozbłyaskowe (SDO/EVE). Czerwone linie oznaczają zakresy widmowe instrumentu SDO/AIA.

[Del Zanna & Mason, 2018]

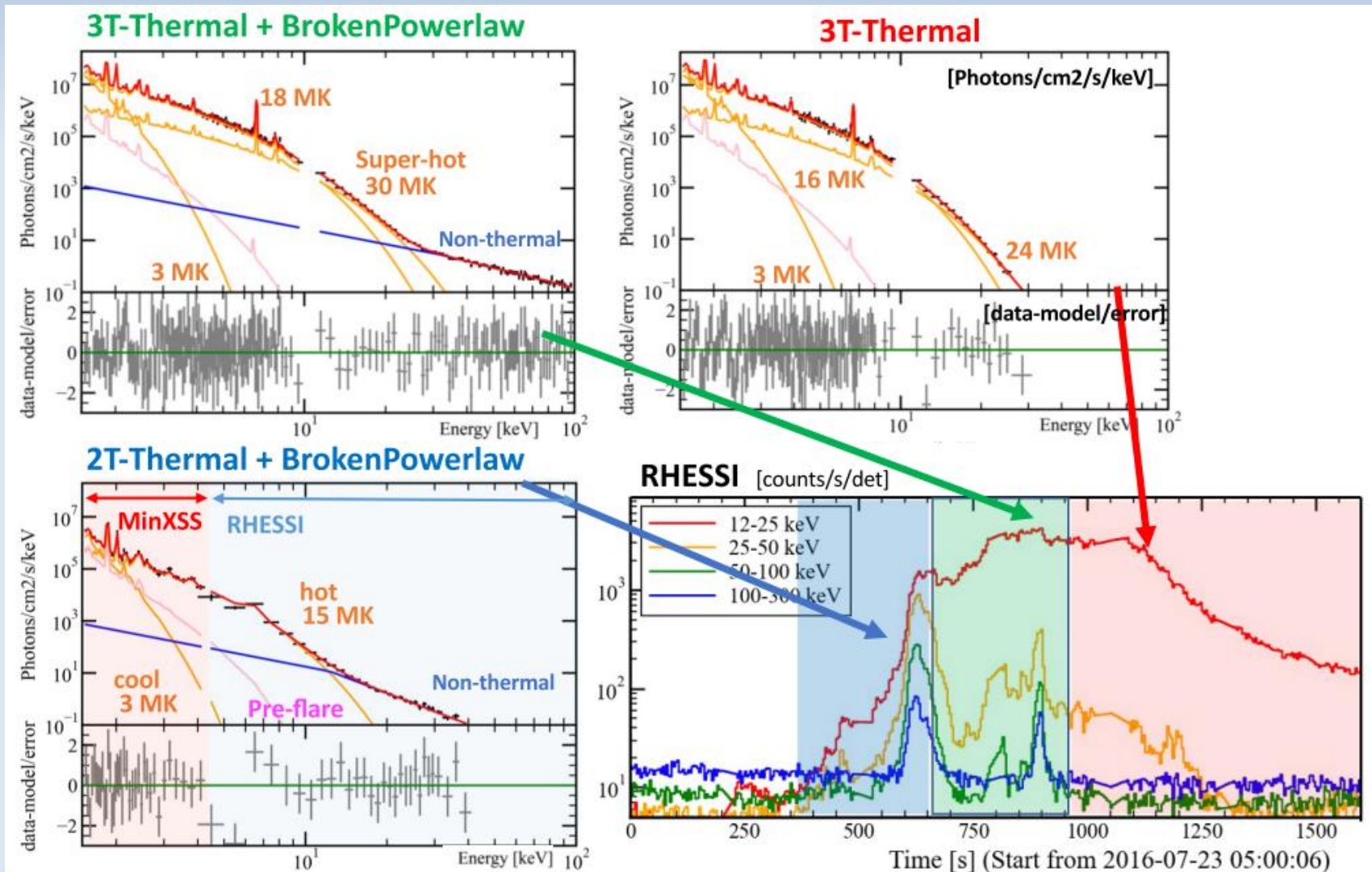


Przykładowe widmo
rozbłyiskowe (2002.09.20) dla 4
momentów czasu (obserwacje +
dopasowanie modeli, RHESSI).
Dopasowane modele: emisja f-f
termiczna + linie Fe/Ni
(niebieska linia), emisja
nietermiczna (zielona linia),
suma modeli – linia czerwona.
Obserwacje – linia czarna.
Widoczna znaczna zmiana
składnika nietermicznego
(nachylenie i strumień) w czasie
ewolucji rozbłyisku.
[Kępa et al. 2020]

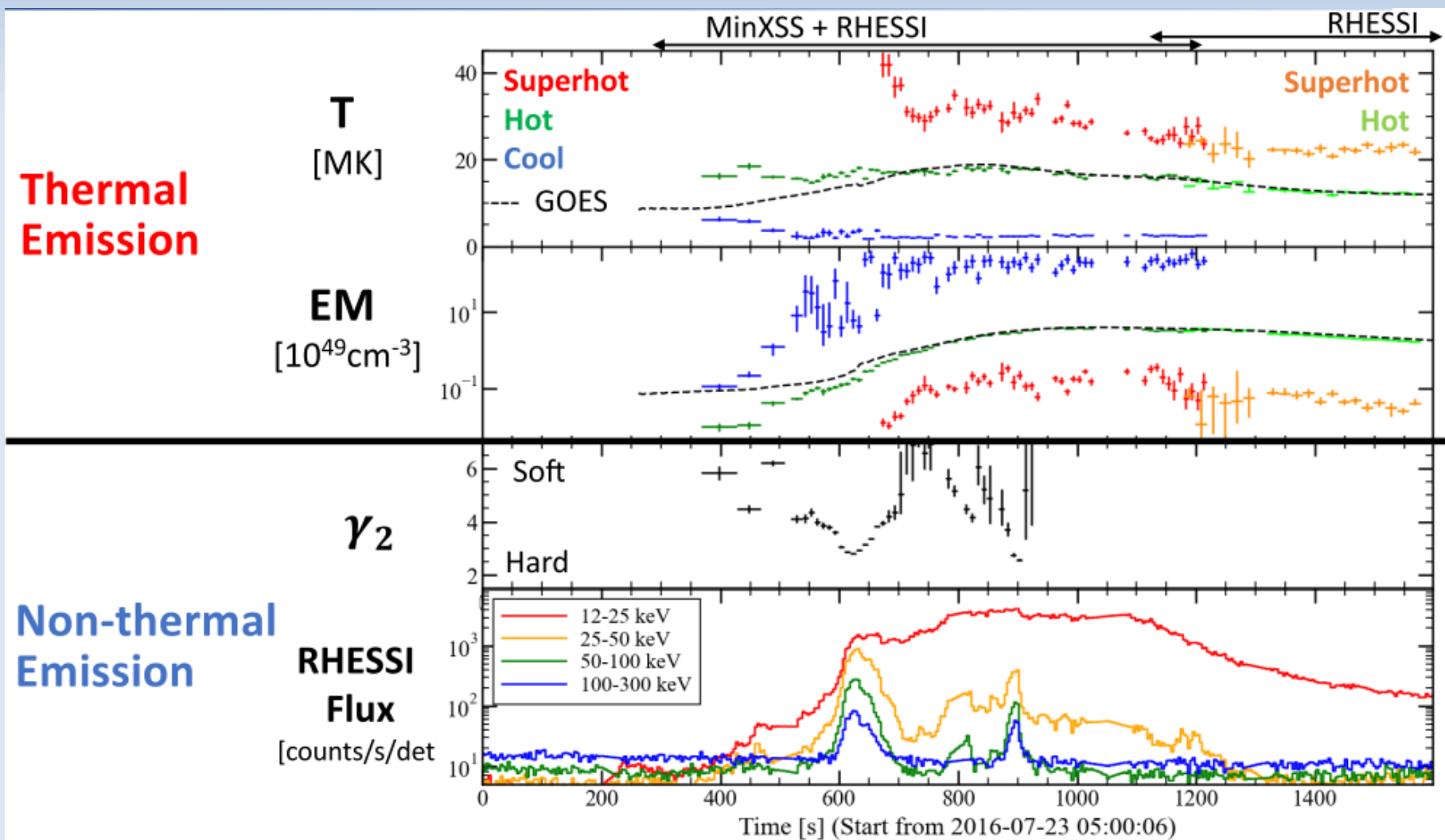




Widmo rozbłysku z 23.07.2002 dla zakresu HXR/gamma. Widoczne linie anihilacji pozytronu ($e^+ + e^-$), wychwytu neutronu (n capture) i de-ekscytacji jądrowej (Mg, Ne, Si, C, O) [obserwacje, RHESSI] [Vlahos et al. 2009]



Widmo rozbłysku z 23.07.2016 dla zakresu XR dla trzech faz jego ewolucji wraz z dopasowaniem modeli (emisja termiczna 2-3 składniki o różnych T , emisja nietermiczna 1 składnik)
 [obserwacje, RHESSI + MinXSS]
 [Nagasawa et al. 2021]



Ewolucja czasowa wielkości fizycznych charakteryzujących plazmę rozbłysku z 23.07.2016 otrzymana z dopasowania modeli do obserwowanego widma (poprzedni slajd) [obserwacje, RHESSI + MinXSS] [Nagasawa et al. 2021]