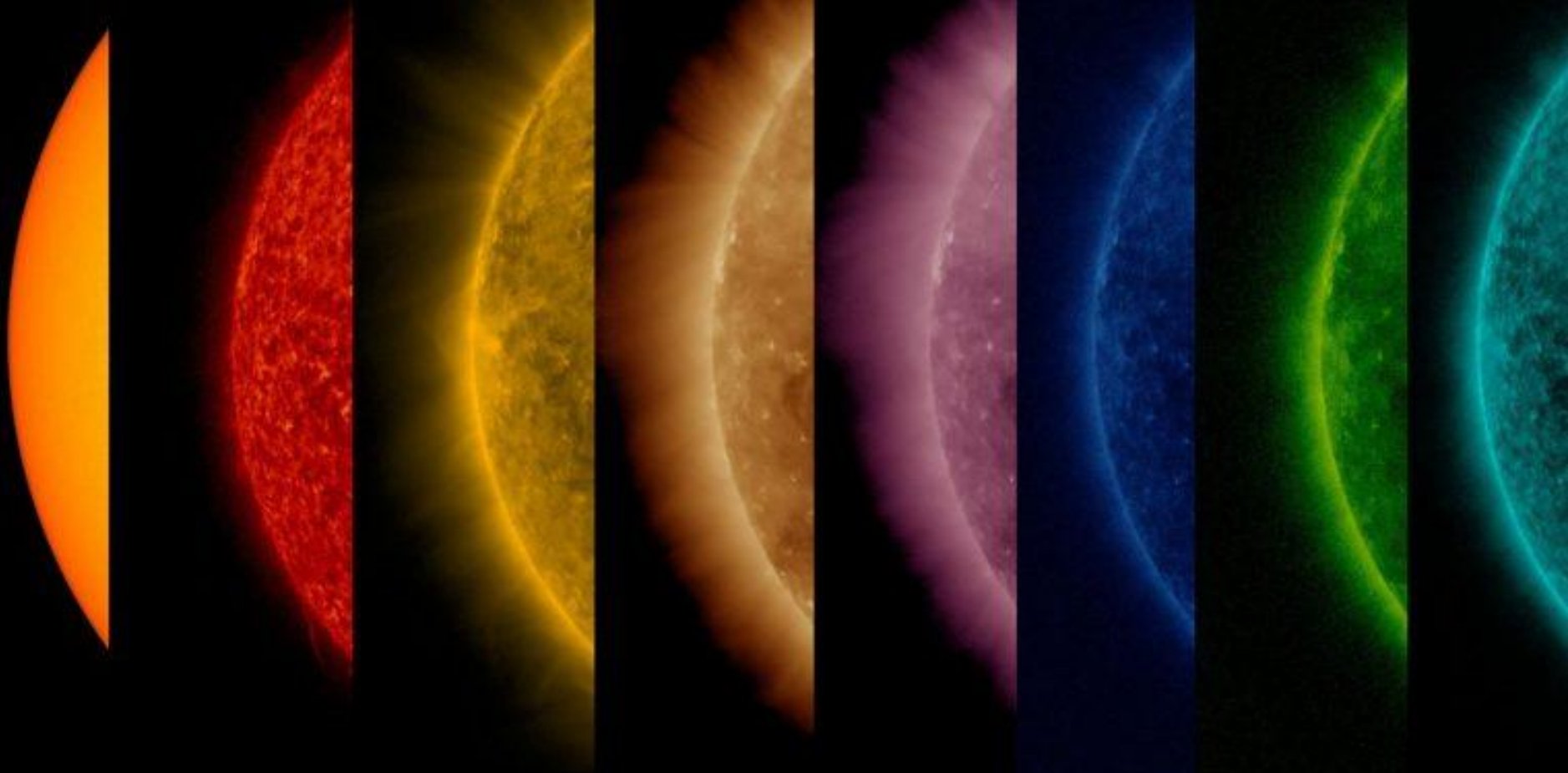


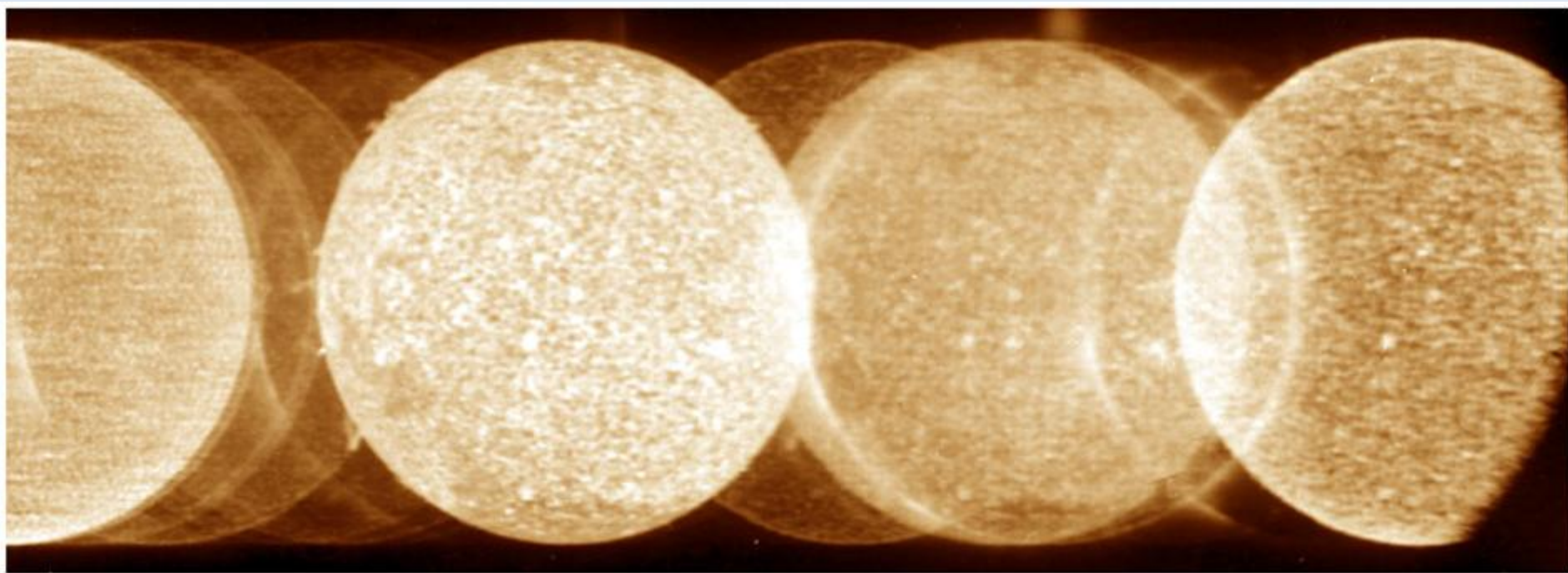
instrumenty obserwacyjne

cz. 1



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

- Idealne obserwacje Słońca: obrazowanie 2D o wysokiej rozdzielczości w połączeniu ze spektroskopią (spektroskopia zintegrowanego pola, integral field spectroscopy)
- Czasem trudne do wykonania, stosuje się metody mniej zaawansowane.
- Rozwiązaniem może być obrazowanie fotometryczne wielobarwne (akcent na obrazowanie)
- W niektórych przypadkach można zrezygnować z rozdzielności przestrzennej (widmo całego Słońca, akcent na uzyskanie widma)
- We wszystkich przypadkach trzeba „nazbierać” fotonów.



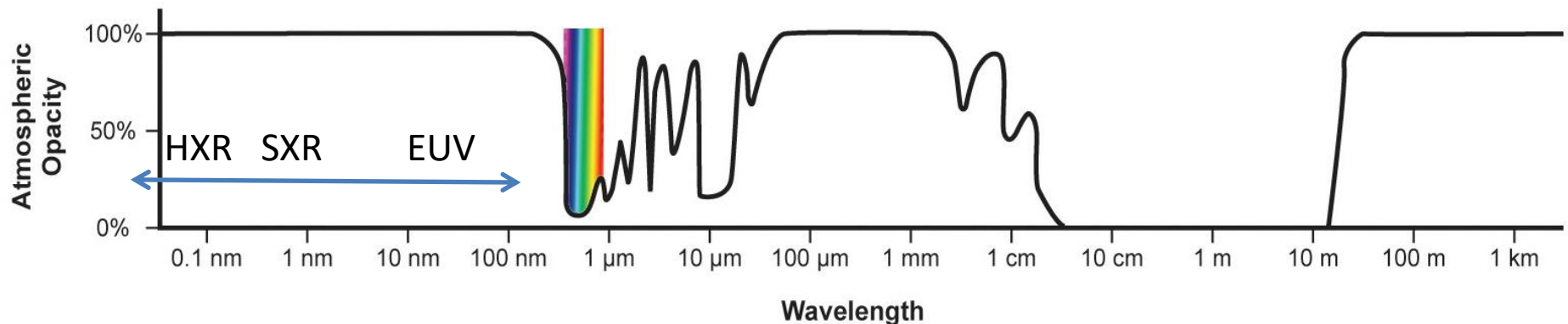
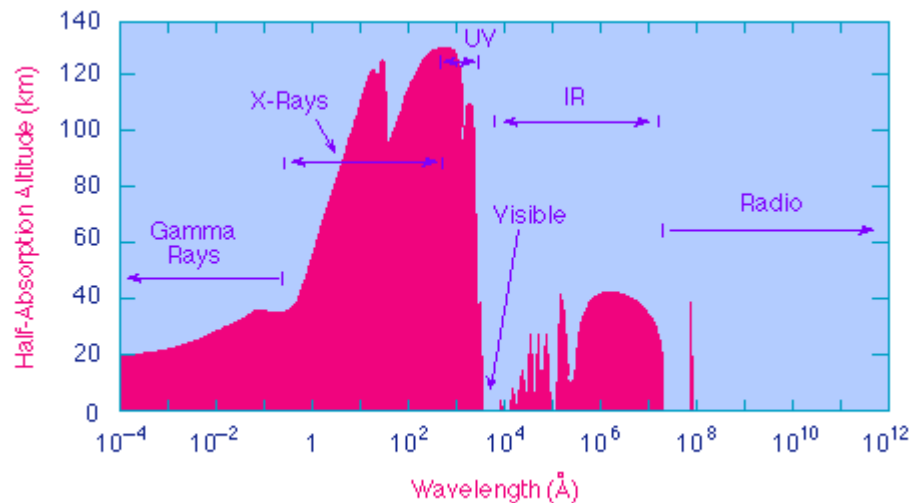
Zdjęcie typu overlappogram z instrumentu Skylab S082A z 26.01.1974 roku, 22:35 UT. Jasny półobraz Słońca po lewej stronie pochodzi z linii O IV przy 554.4 Å, a jasny fragment obrazu po prawej to linia O V przy 629.7 Å. Najjaśniejszy obraz na lewo od środka pochodzi z linii He I 584.3 Å. [Young, 2021]

instrumenty

Obserwacje Słońca w zakresie wysokich energii możliwe są tylko ponad atmosferą.

- obserwacje raketowe i balonowe
- obserwacje satelitarne (orbity geo- i heliocentryczne, punkty L)

Dodatkowe zyski z obserwacji pozaatmosferycznych: redukcja światła rozproszonego, eliminacja seeingu, wydłużenie ciągłych obserwacji



Obrazy Słońca w zakresie wysokich energii można wykonać w wąskich lub szerokich przedziałach promieniowania:

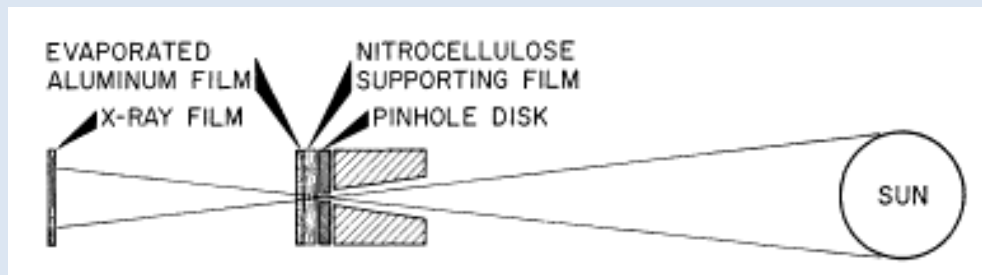
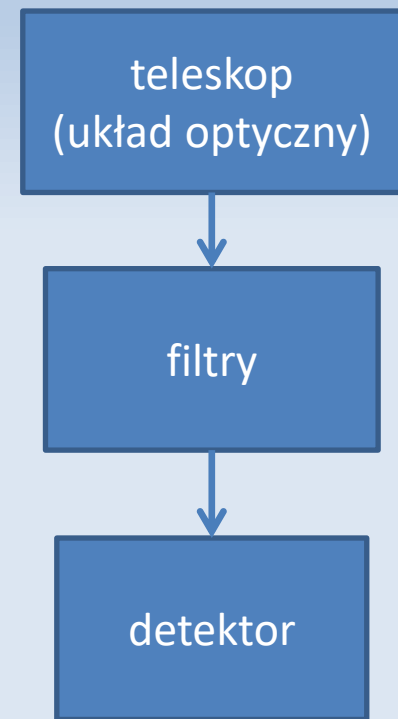
- filtry wąskopasmowe (wybrana linia lub grupa linii)
- filtry szerokopasmowe (linie i kontinuum)
- rozdzielczość energetyczna detektora

Promieniowanie zbierane jest przez układ optyczny (teleskop)

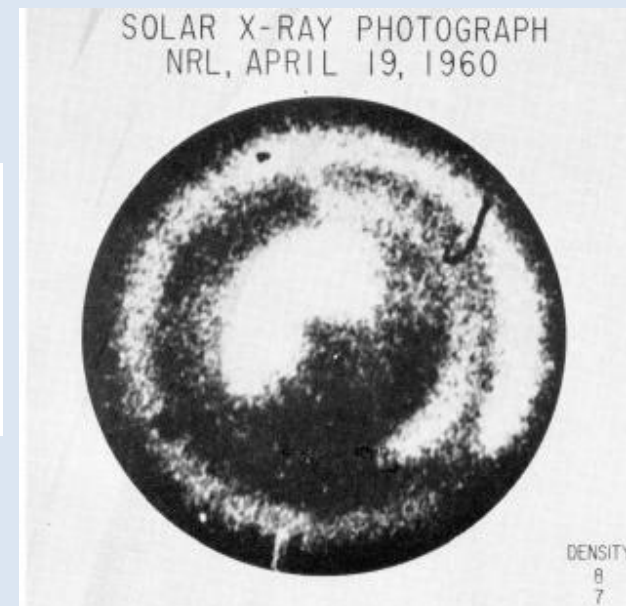
- kamera otworkowa (pinhole camera)
- układ optyczny z klasycznym zwierciadłem (normal incidence, NI)
- układ optyczny ślizgających promieni (grazing incidence, GI)
- kolimatory / modulatory / apertury kodowane

Zebrałe promieniowanie rejestrowane jest przez detektor

- klisza fotograficzna
- CCD / CMOS
- detektory półprzewodnikowe

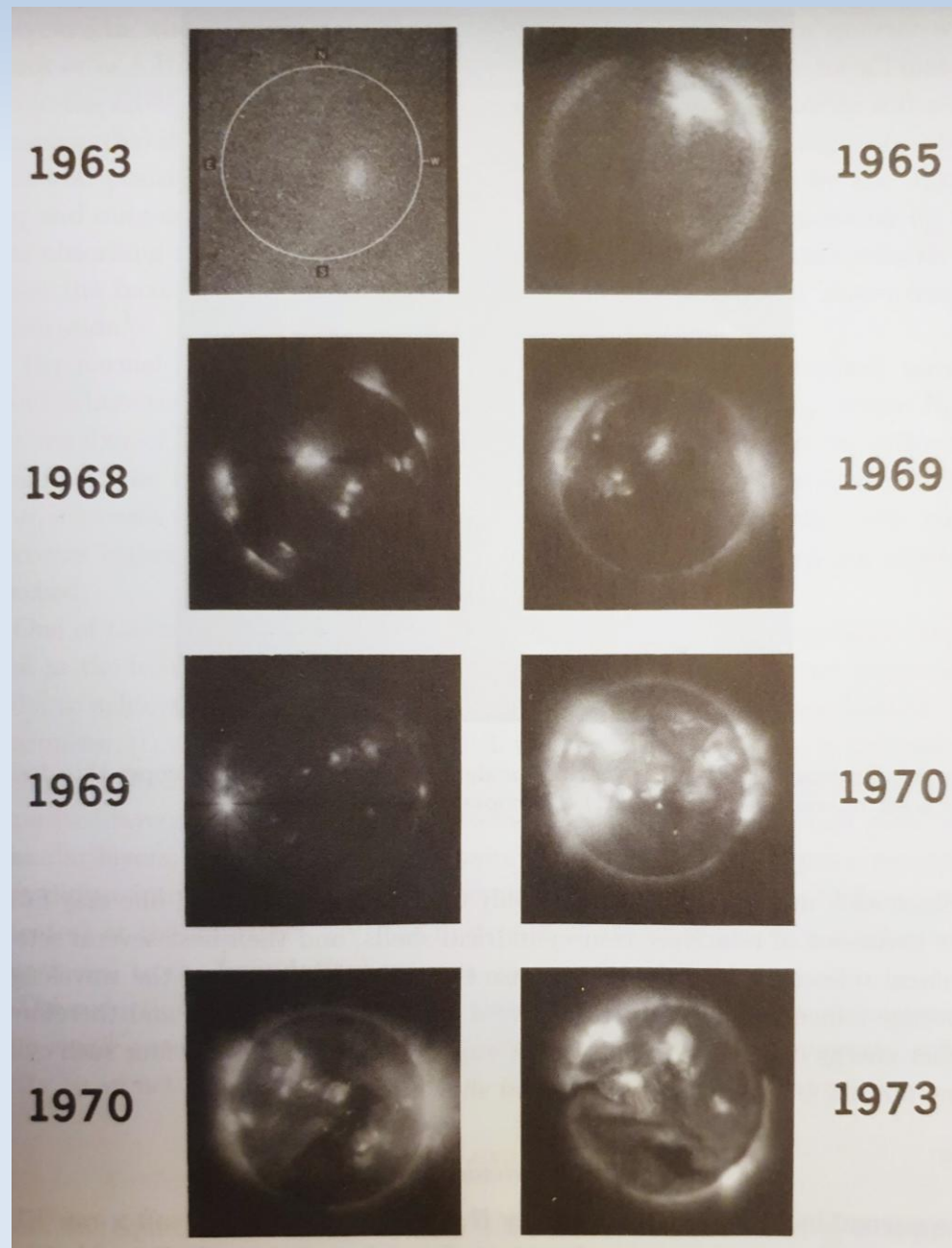


Pierwszy w historii obraz rentgenowski Słońca oraz konstrukcja teleskopu, którym obraz uzyskano. Misja raketowa z 19.04.1960. [Blake et al. 1963]



- Pierwsze obserwacje Słońca w wysokich energiach realizowano dzięki misjom raketowym.
- Pierwsze obserwatoria satelitarne słoneczne to przełom lat `50 i `60.
- Istotny rozwój technik obserwacyjnych, nastąpił w latach `60 i `70. Opracowane wówczas typy instrumentów są nadal używane. W tym czasie odkryto typowe struktury koronalne m.in.: obszary aktywne, dziury koronalne, jasne punkty.
- Duży postęp w badaniach Słońca w wysokich energiach dzięki obserwacjom ze stacji Skylab (1973-74)

10 lat rozwoju teleskopów pozwalających uzyskiwać obrazy w XR [Golub 2010]



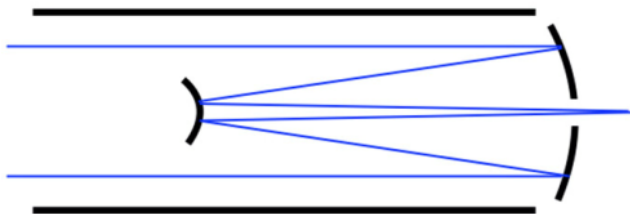
Soczewki jako elementy optyczne teleskopów są użyteczne dla fal $>1100\text{-}1300\text{ \AA}$ ($<0.01\text{ keV}$).

W zależności od dł. fali wykorzystuje się następujące metody uzyskiwania obrazów w wysokich energiach:

- $>500\text{ \AA}$ ($<0.025\text{ keV}$) – zwykłe lustra o optyce normal incidence (NI)
- $50\text{-}500\text{ \AA}$ ($0.025\text{ - }0.25\text{ keV}$) – lustra wielowarstwowe o optyce normal incidence (NI-ML)
- kilka – $50\text{ \AA}$ ($0.25\text{ - }kilkadziesiąt\text{ keV}$) – lustra z optyką grazing incidence (GI) (testowo do 50 keV)
- $<\text{kilku}\text{ \AA}$ ($>\text{kilku}\text{ keV}$) - kolimatory

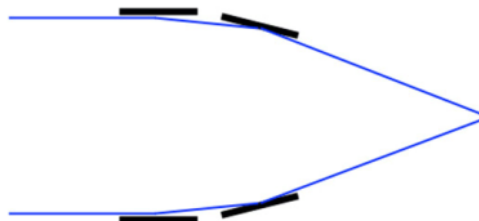
NORMAL INCIDENCE

EUV ($> 50\text{ \AA}$)
[EIS, AIA, IRIS, SPICE]



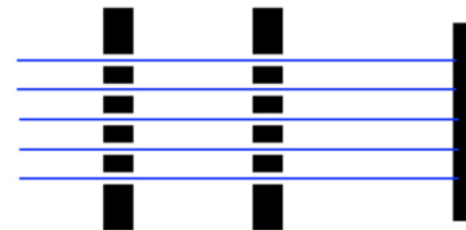
GRAZING INCIDENCE

X-rays ($< 50\text{ \AA}$)
[XRT]

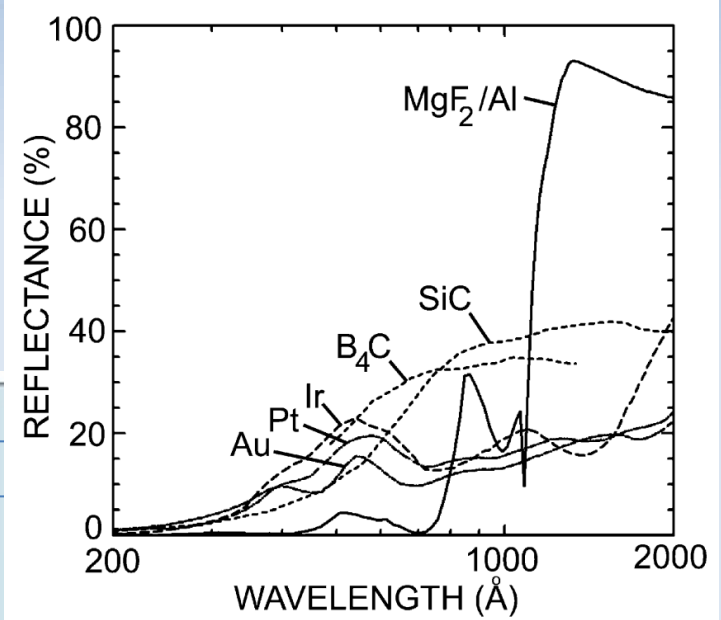
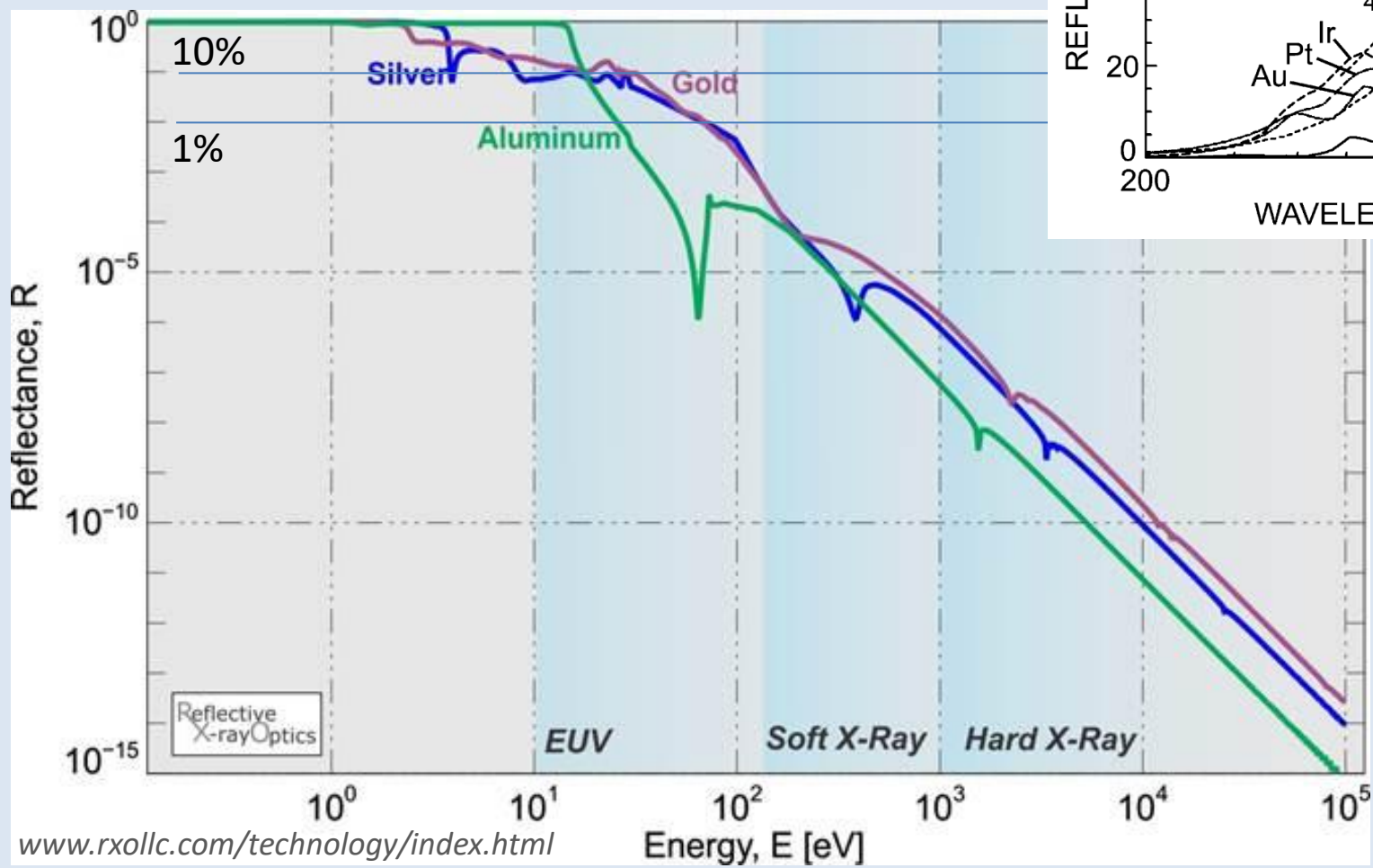


COLLIMATORS

X-rays ($< 50\text{ \AA}$)
[RHESSI]

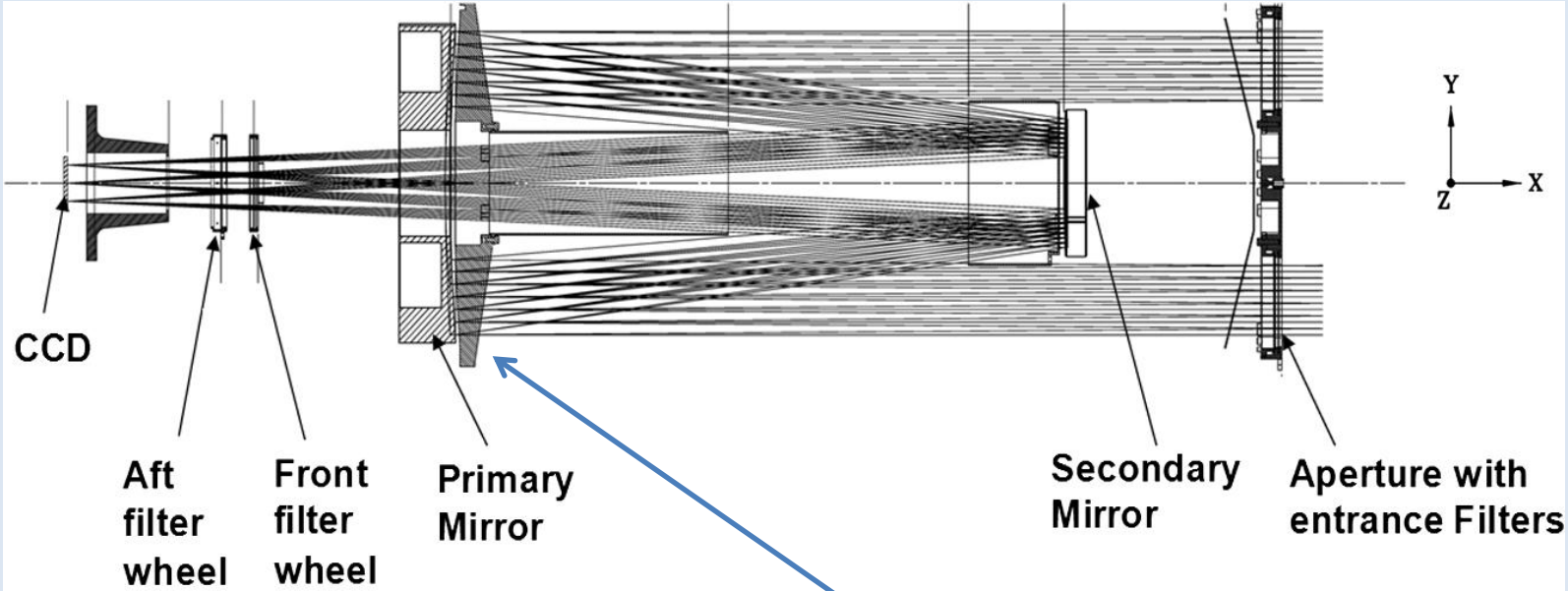


Podział wynika z możliwości odbicia promieniowania od lustra w zależności od dł. fali. W zakresie EUV dla $<500 \text{ \AA}$ ($>0.025 \text{ keV}$) odbicie spada poniżej 10%.



Odbicie promieniowania od różnych materiałów stosowanych jako powłoki lusterek [Golub 2010]

Pokrycie lustra wieloma warstwami odbiciowymi (normal-incidence multilayer optics NI-ML) pozwala podnieść odbicie do poziomu 30-70%. Umożliwia to zbudowanie klasycznych układów optycznych dla zakresu EUV. Tworzenie tego typu lusterek wymaga umiejętności nanoszenie warstw o grubości dziesiątek Å o ostrych granicach.

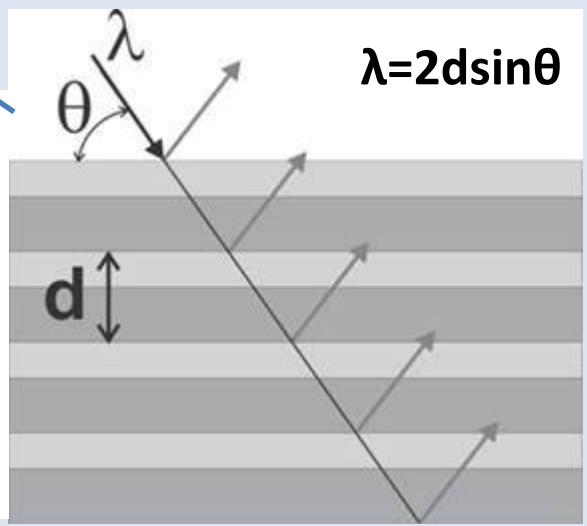
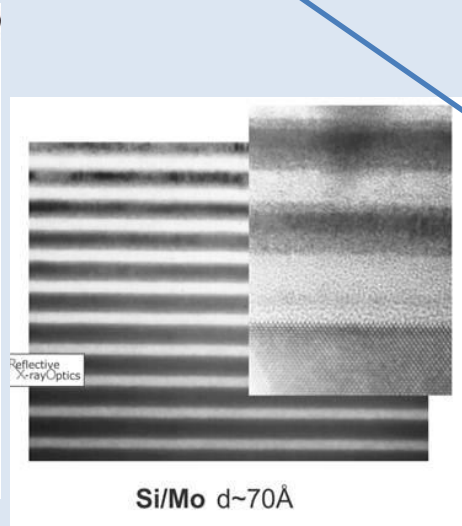


Konstrukcja optyczna teleskopu AIA.

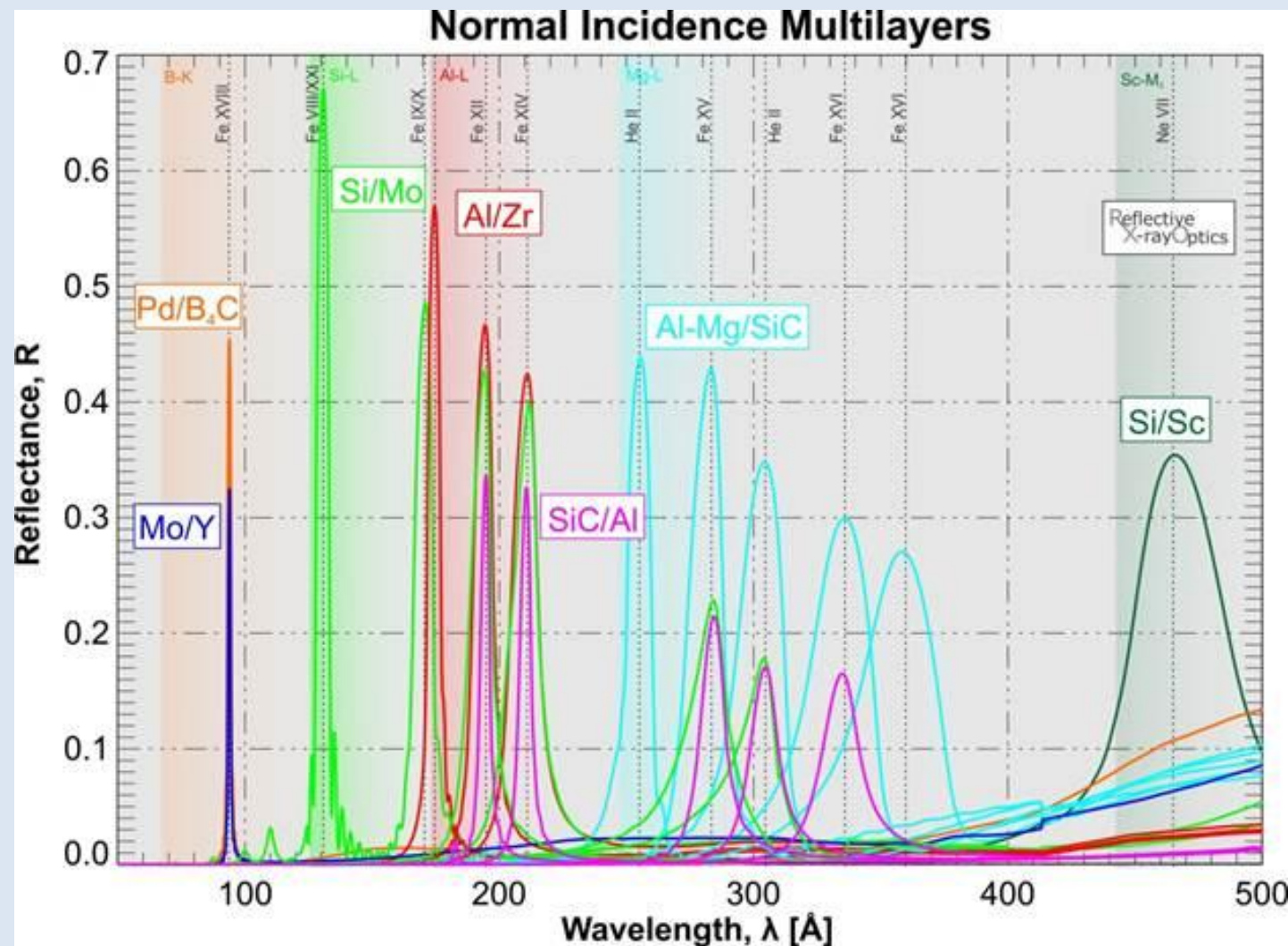
Lustro tego teleskopu, częściowo ukończone.

Powłoka wielowarstwowa lustra – obraz z mikroskopu elektronowego.

Ogólna zasada działania lustra wielowarstwowego.



- Na lustro nanosi się >10 par warstw składających się z materiału mających odmienne właściwości optyczne.
- Grubość pojedynczej pary wynosi kilkadziesiąt Å
- Podwyższenie odbicia występuje jedynie na wąskim przedziale dł. fal ($d\lambda/\lambda \sim 0.01-0.1$), więc pokrycie wielowarstwowe działa jak filtr wąskopasmowy.



Teoretyczne odbicie dla niektórych par materiałów możliwych do stosowania w lustrach wielowarstwowych. Pionowe linie wskazują położenie głównych linii emisyjnych Fe.

Wybrane satelitarne obserwatoria EUV

SoHO, teleskop EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope)

Układ optyczny: NI-ML

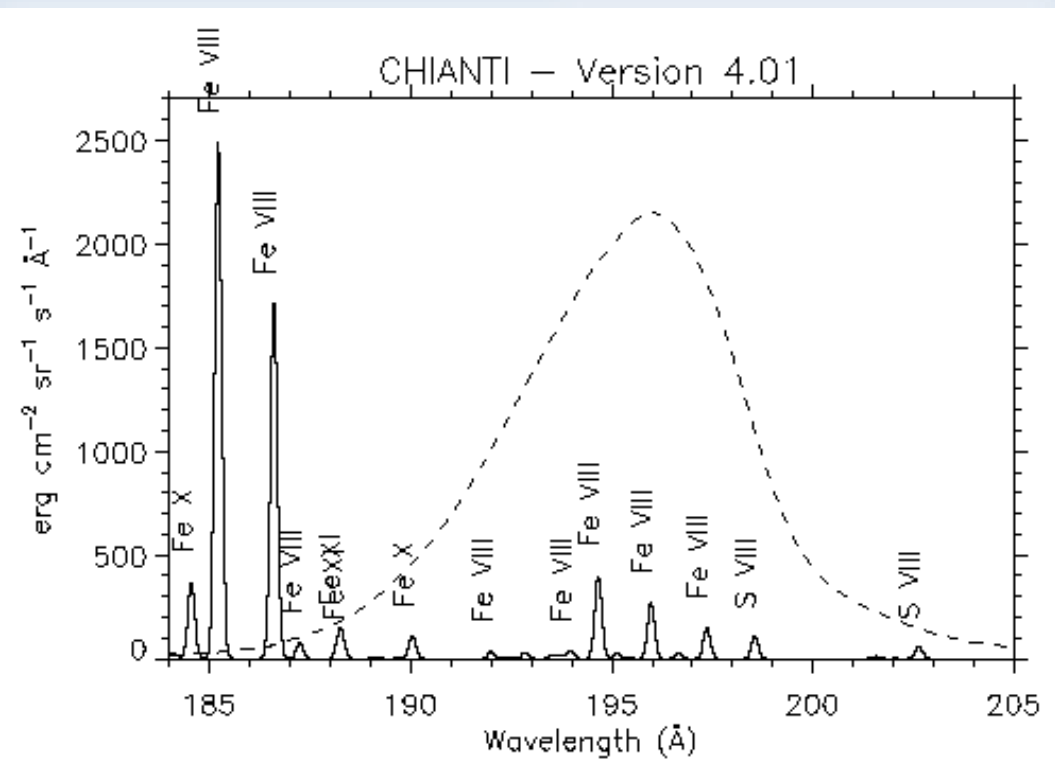
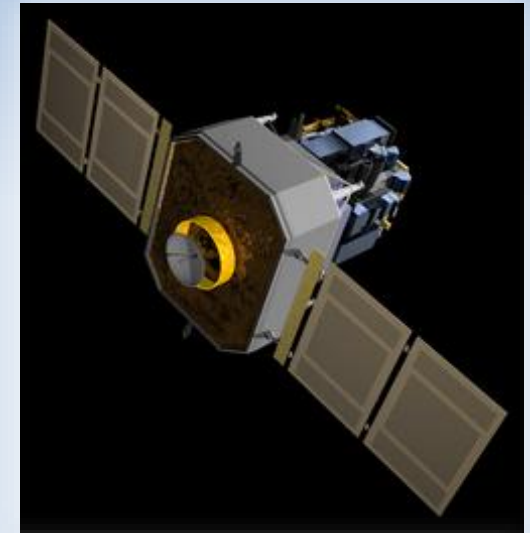
Zakres: 171, 195, 284 i 304 Å

Filtry wąskopasmowe, około 10 Å

Pole widzenia 44x44 arcmin

Rozdzielczość: 2.6 arcsec/px

Czas: 1995-...

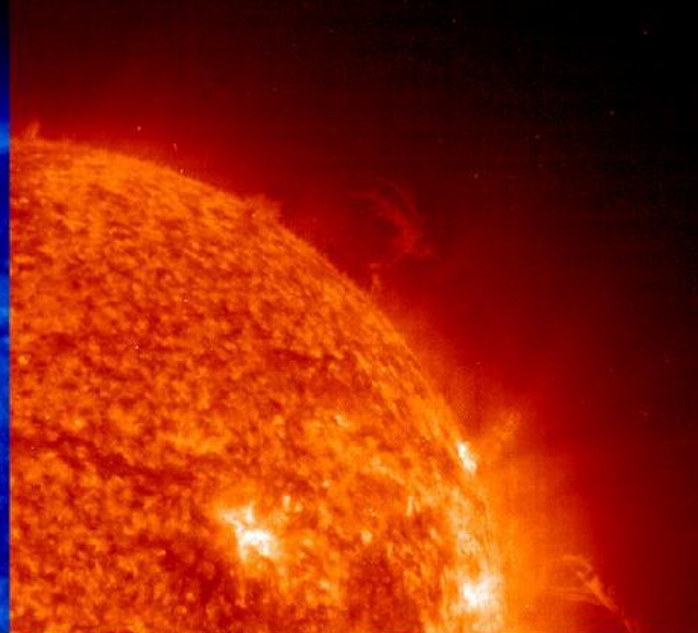


Widmo w obszarze pasma EIT 195

EIT 171 (Fe IX i X, 0.9-1.0 mln K)

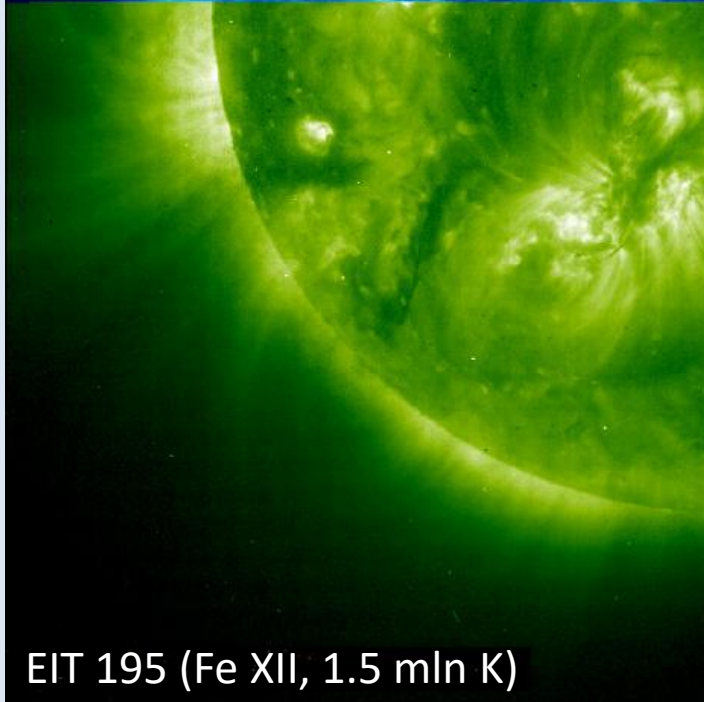


EIT 304 (He II, 60-80 tys. K)

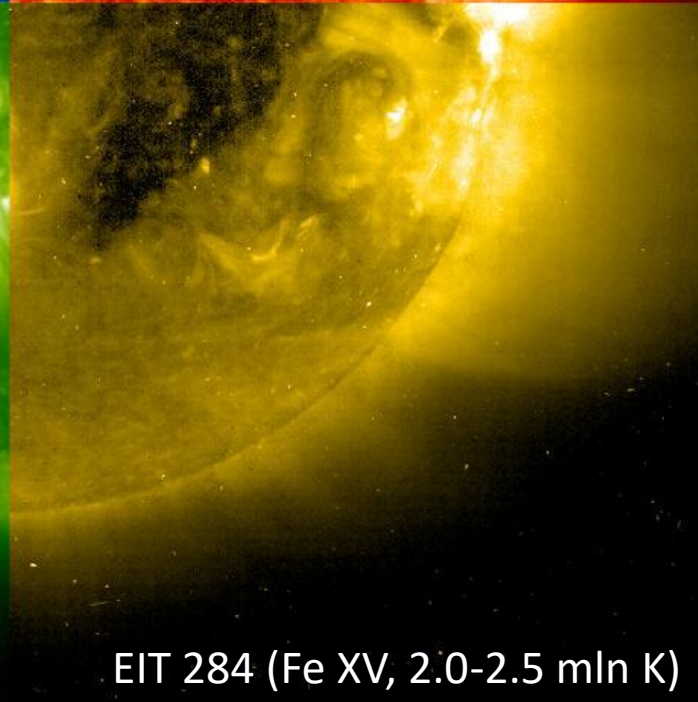


*Przykładowe obrazy w
czterech pasmach
widmowych EIT.*

*Podane są główne linie
emisyjne danego pasma i
charakterystyczna temp.
formowania.*

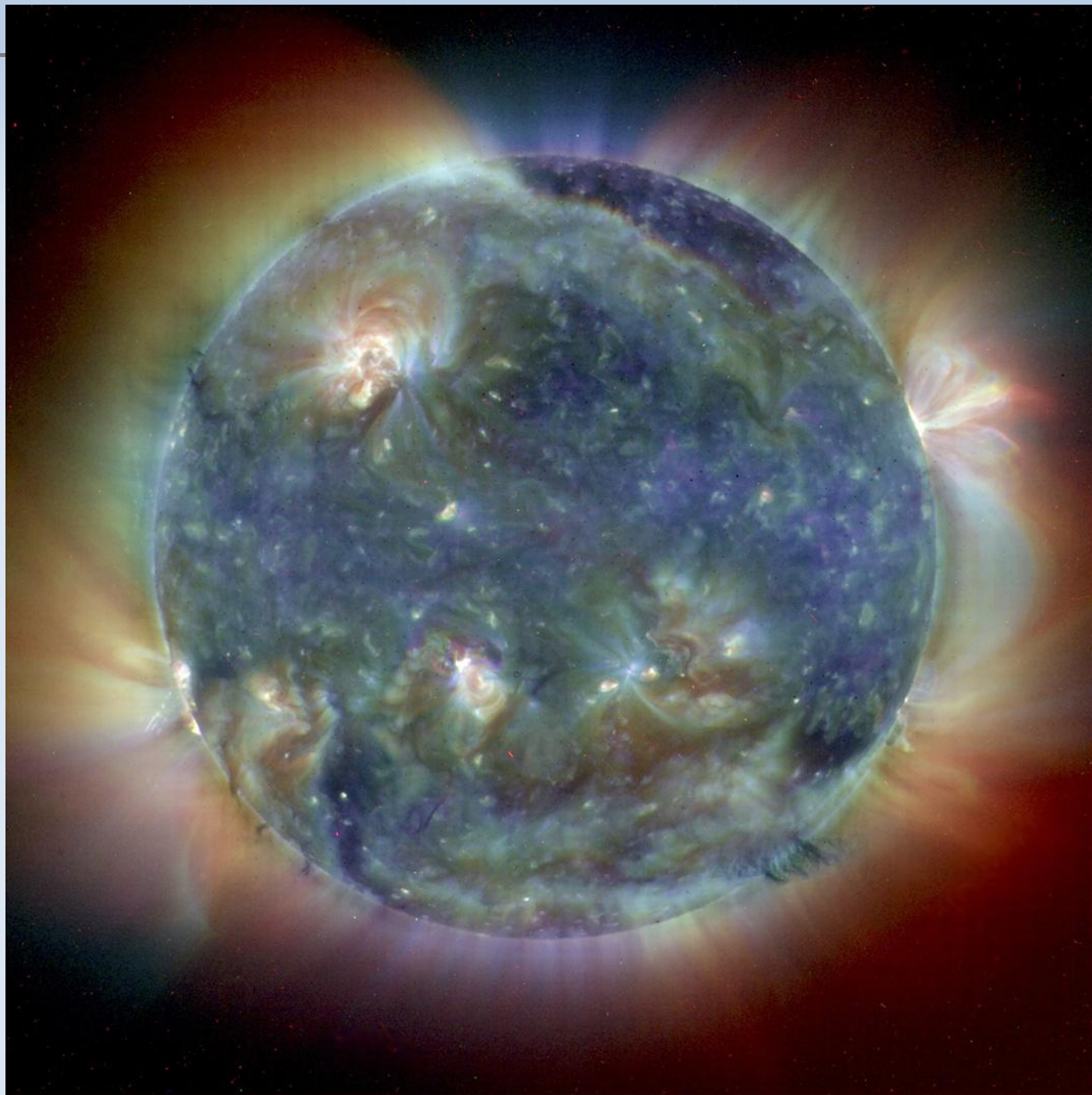


EIT 195 (Fe XII, 1.5 mln K)



EIT 284 (Fe XV, 2.0-2.5 mln K)

*Obraz EIT złożony z obrazów
171 (niebieski),
195 (zielony) i
284 (czerwony).*



teleskop TRACE (Transition Region and Coronal Explorer)

Układ optyczny: NI-ML

Zakres: 171, 195, 284 Å + filtry UV i światło białe

Filtry wąskopasmowe, około 10 Å

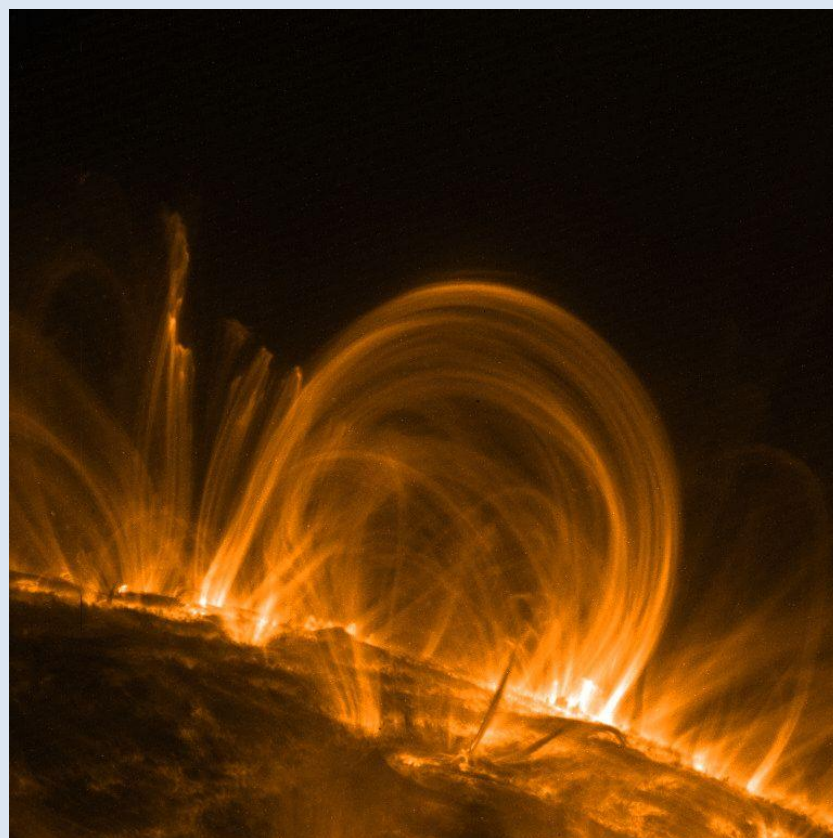
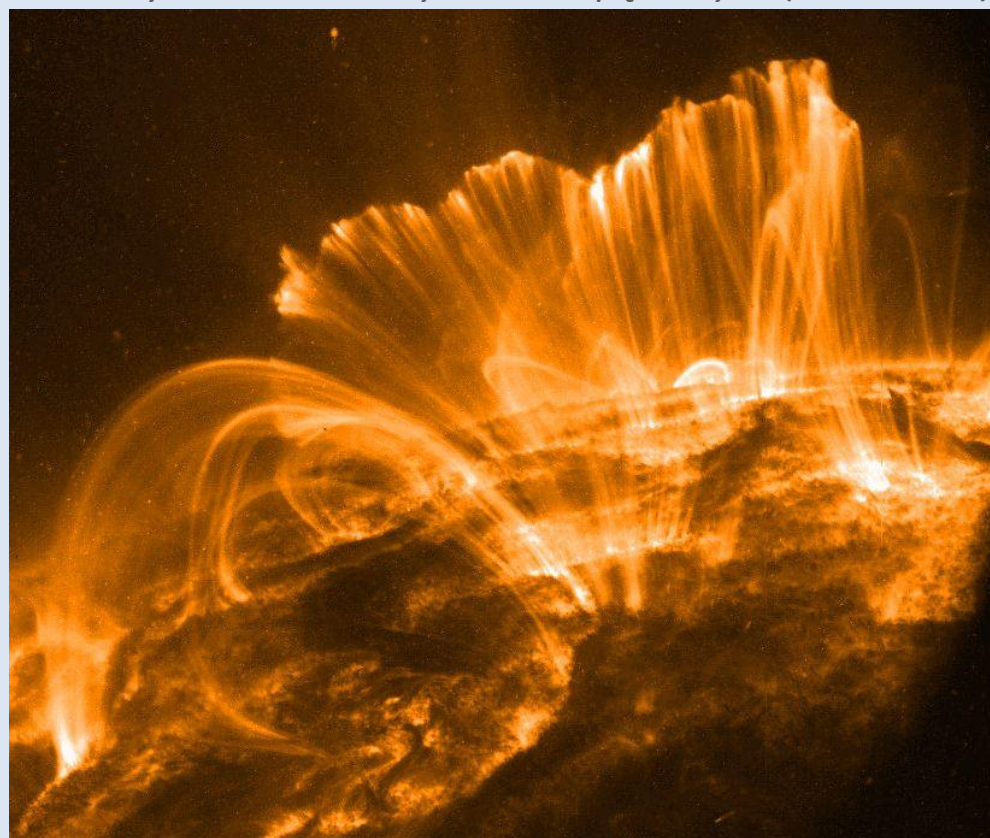
Pole widzenia 8.5x8.5 arcmin

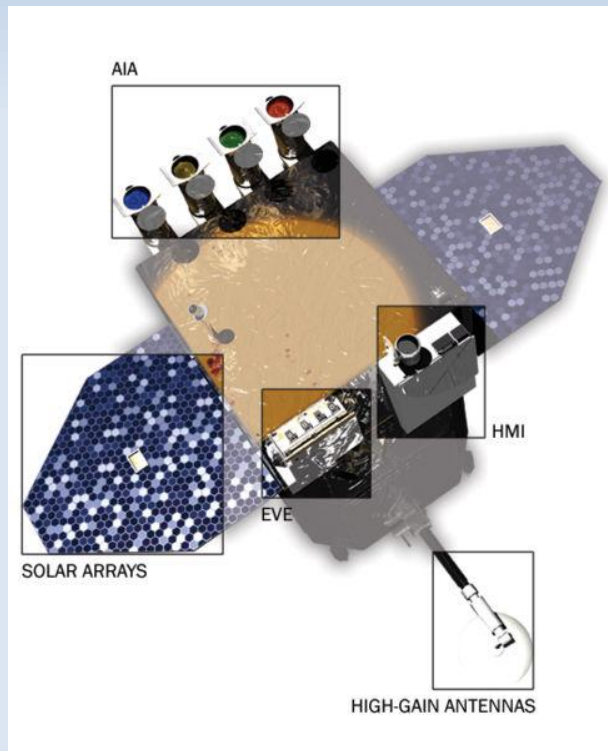
Rozdzielczość: 0.5 arcsec/px

Czas: 1998-2010

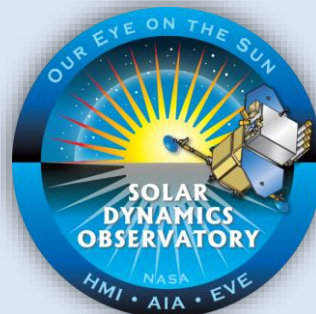


Przykładowe obrazy struktur pętlowych (TRACE 171)





SDO/AIA



instrumenty

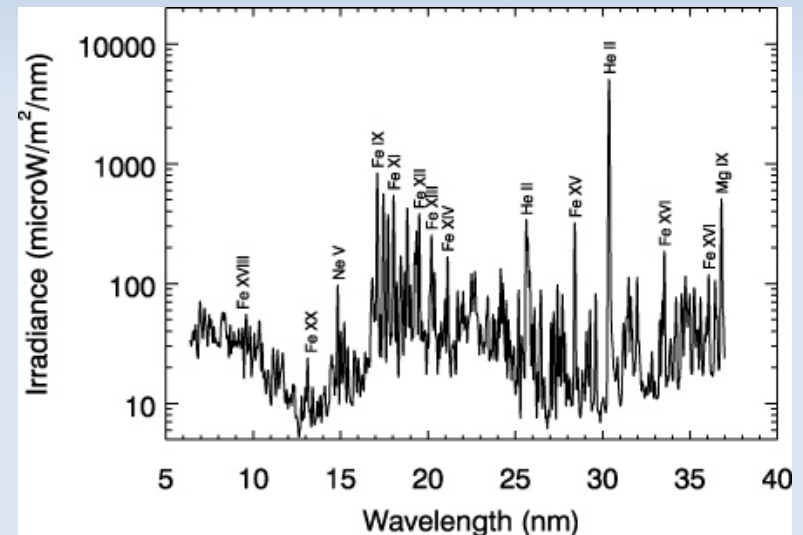
obserwatorium **Solar Dynamics Observatory**

na orbicie od 11.02.2010

instrumenty naukowe:

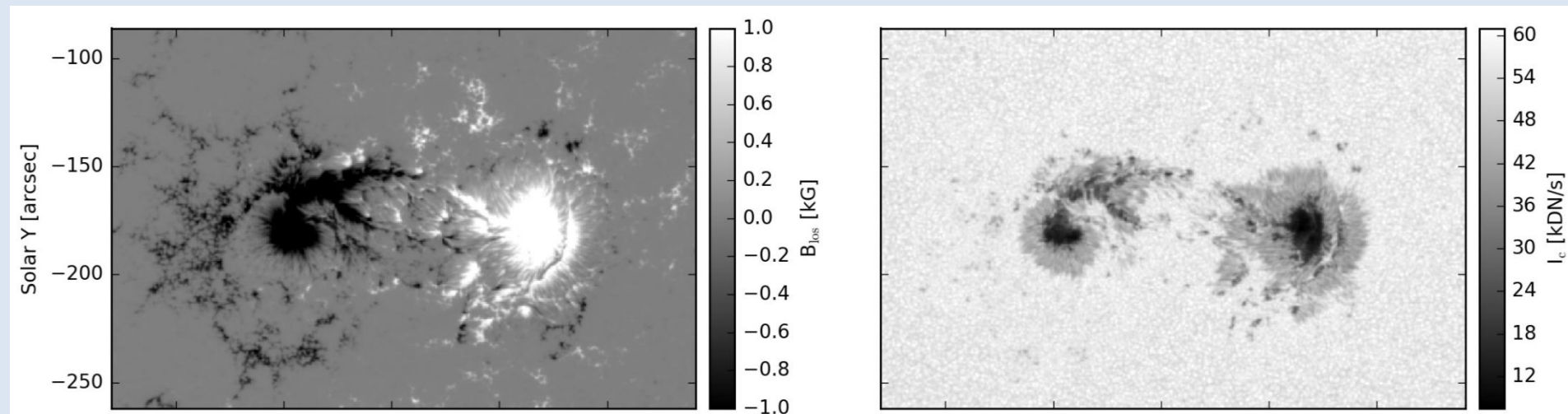
- EUV Variability Experiment (**EVE**)
 - zakres 0.1-105 nm
 - rozdzielczość widmowa – 0.1 nm, czasowa – 10 s
- Helioseismic and Magnetic Imager (**HMI**)
- Atmospheric Imaging Assembly (**AIA**)

przykładowe widmo z EVE



Pesnell i in. 2012, Solar Physics 275, 3 „The Solar Dynamics Observatory (SDO)”

przykładowy obraz HMI (magnetogram i kontinuum – linia absorpcyjna Fe I @ 6173 Å)



teleskop AIA (Atmospheric Imaging Assembly)

układ optyczny: NI-ML

zakres: EUV, UV i Vis

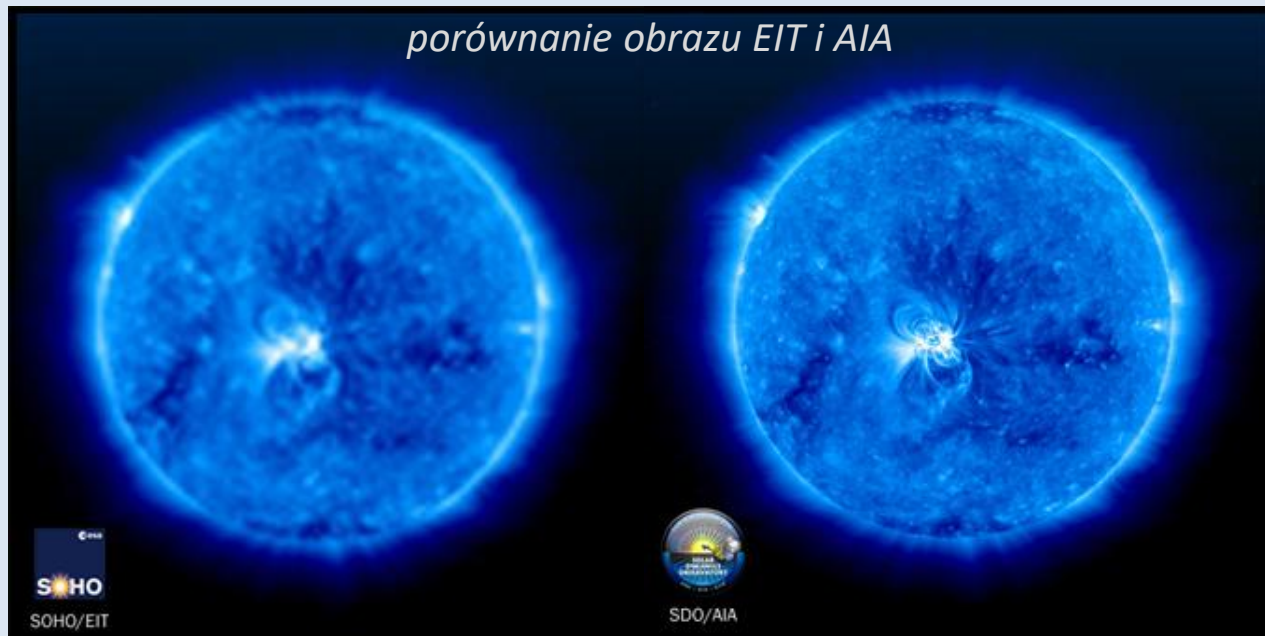
pasma widmowe:

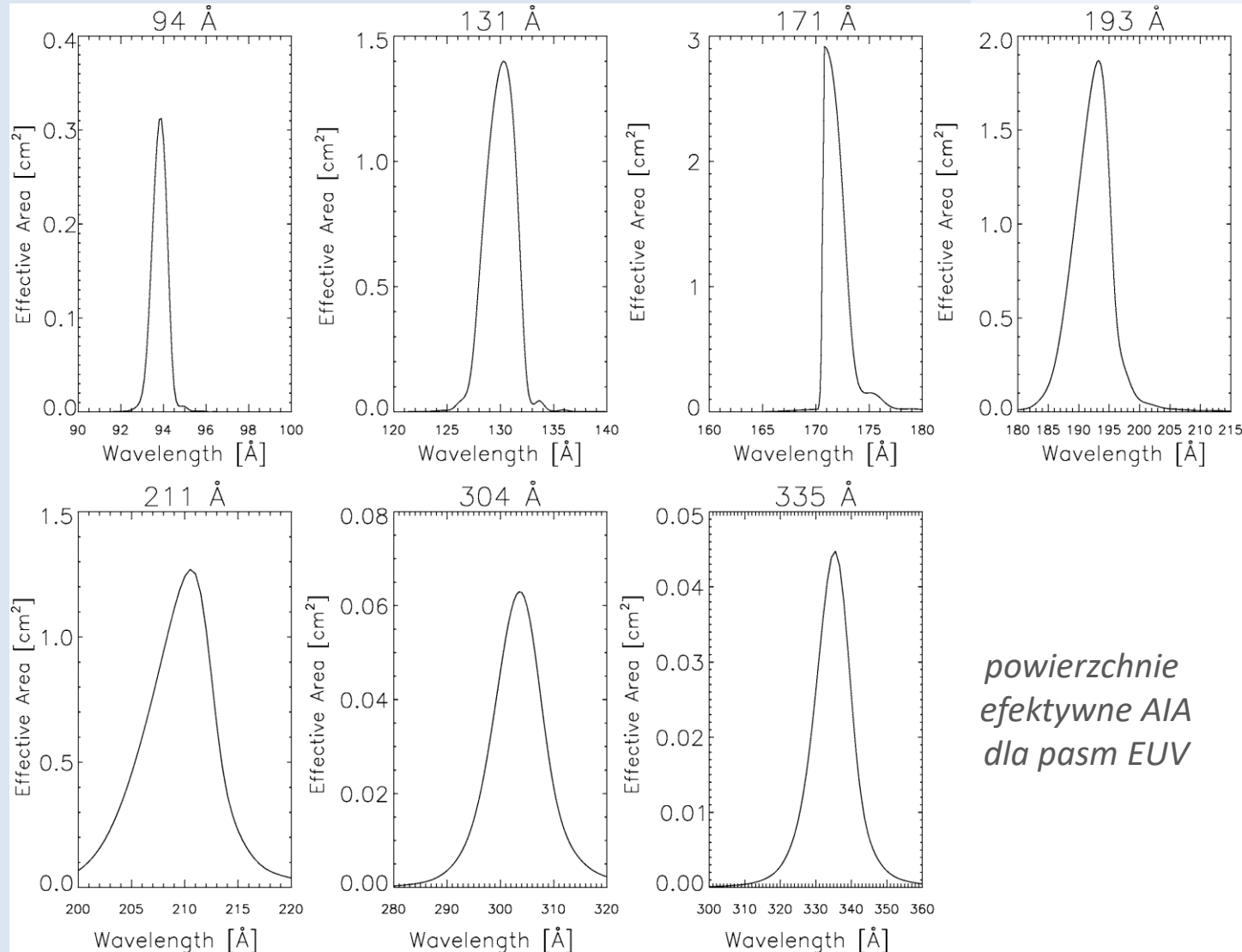
- 7 pasm w EUV: Fe XVIII (94 Å), Fe VIII, XXI (131 Å), Fe IX (171 Å), Fe XII, XXIV (193 Å), Fe XIV (211 Å), He II (304 Å), Fe XVI (335 Å)
- 3 w UV-V: C IV (ok. 1600 Å), kontinuum (1700 Å i 4500 Å)

rozdzielczość czasowa: 10 s

pole widzenia 41x41 arcmin (4096x4096 px)

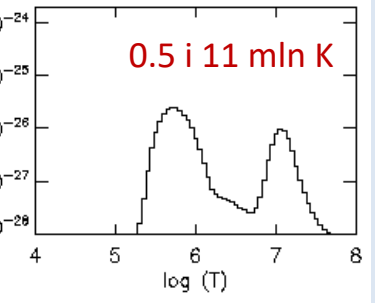
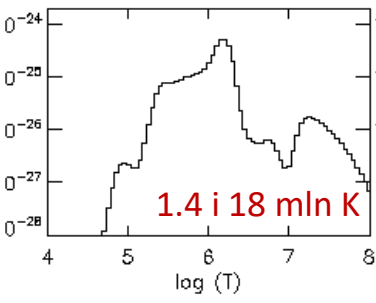
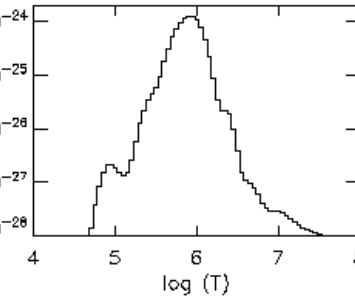
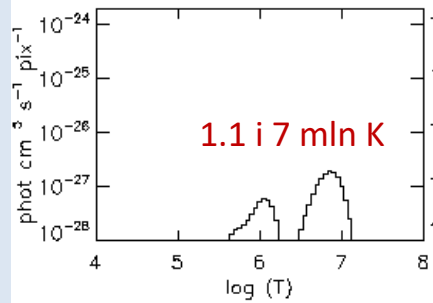
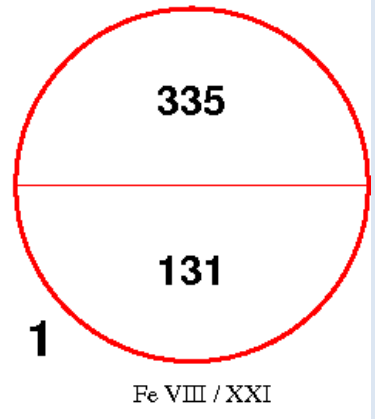
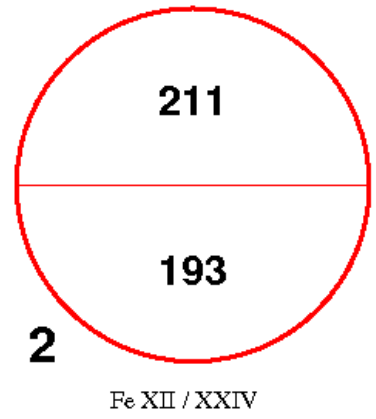
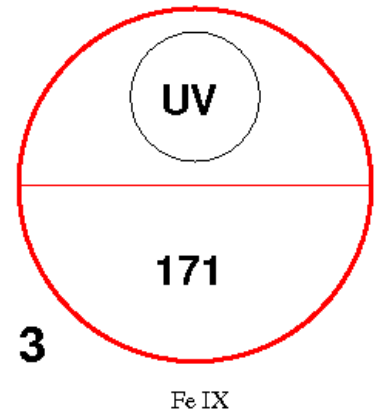
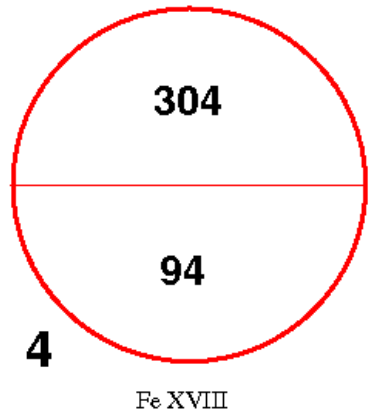
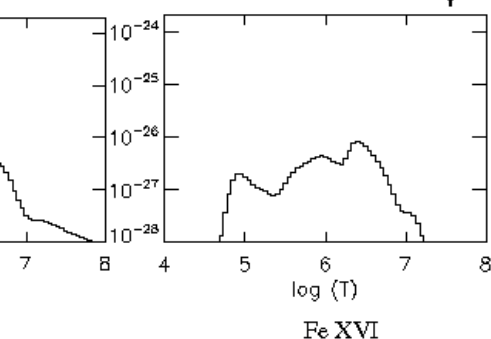
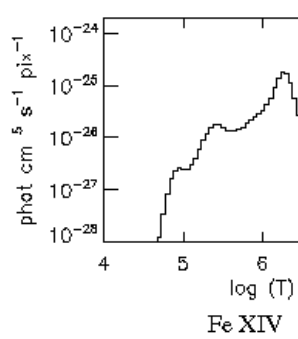
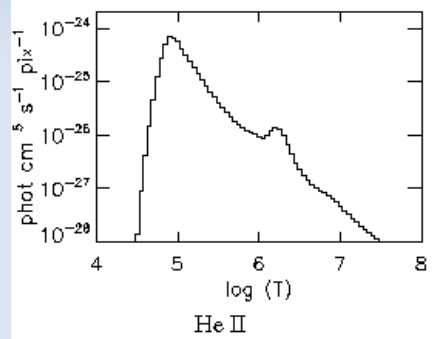
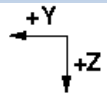
rozdzielczość kątowna: 0.6 arcsec/px, rozmiar źródła punktowego: 1.4''-1.7''



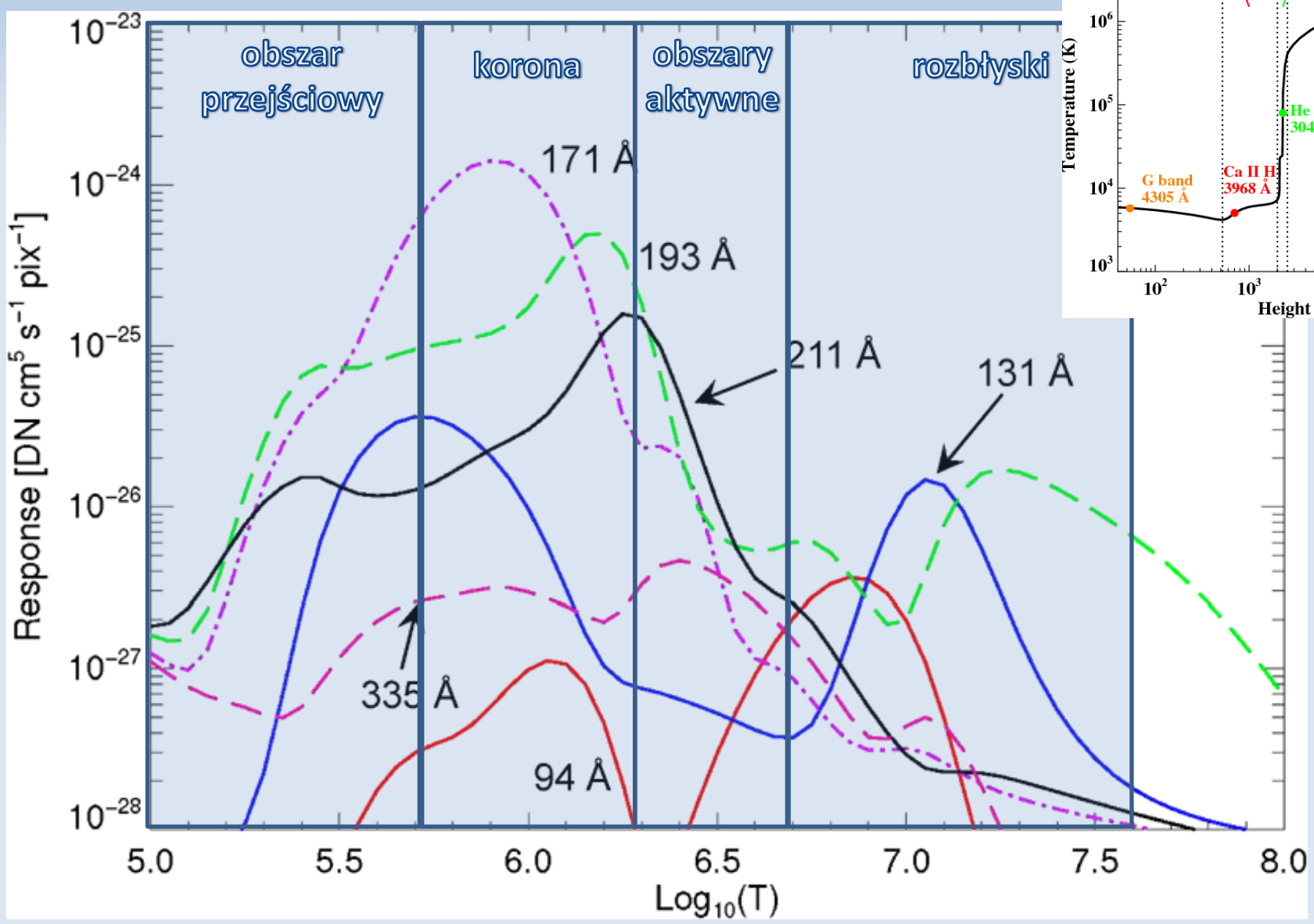


*powierzchnie
efektywne AIA
dla pasm EUV*

AIA Telescopes, Wavelengths, and Thermal Response



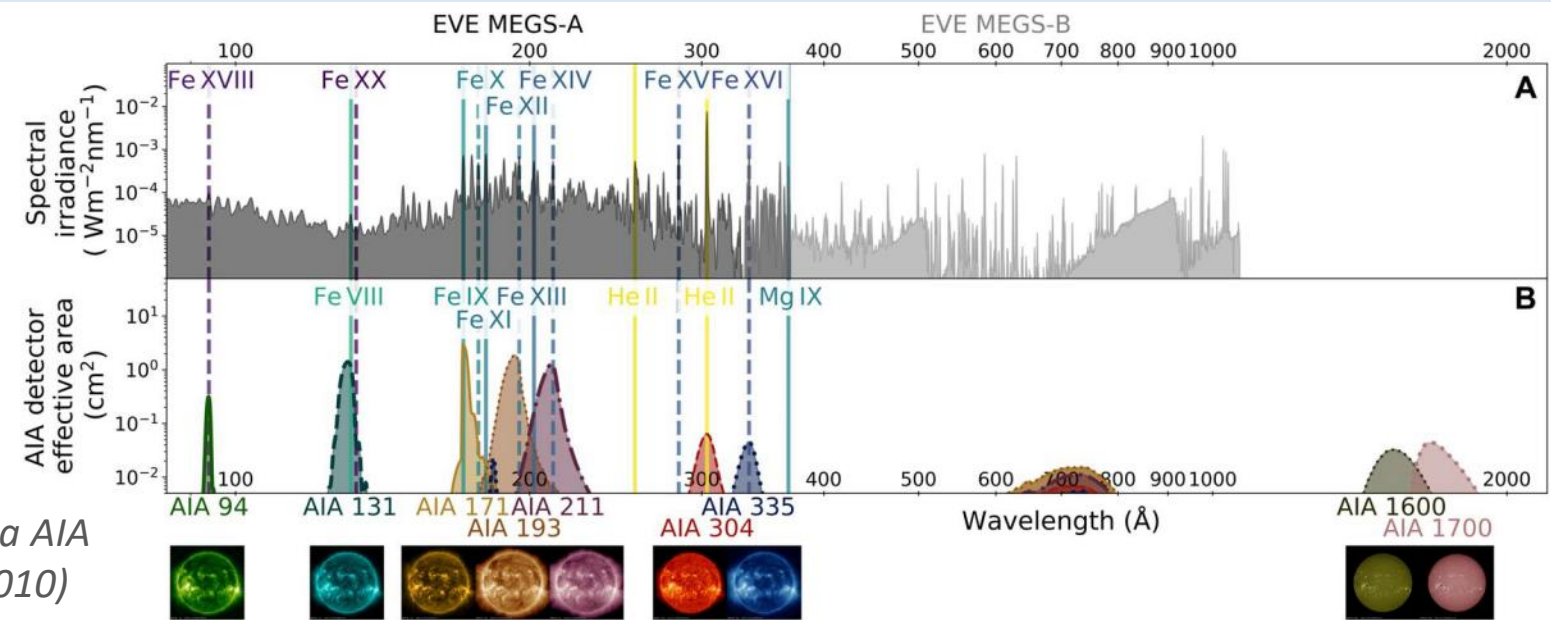
Czułość termiczna pasm EUV. Niektóre pasma mają dwa wyraźne maksima czułości dla wyraźnie różnych temperatur (opisane na wykresach).



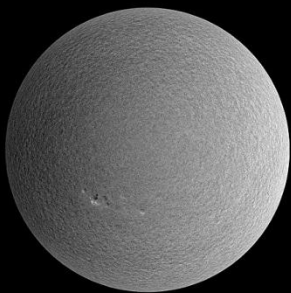
Czułość termiczna pasm EUV i struktura termiczna atmosfery Słońca

Table 1 The primary ions observed by AIA. Many are species of iron covering more than a decade in coronal temperatures. (Lemen et al., 2010)

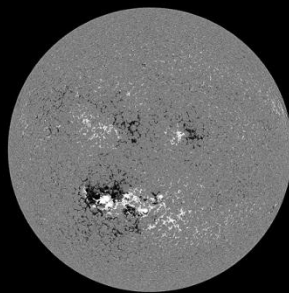
Channel	Primary ion(s)	Region of atmosphere	Char. log(<i>T</i>)
4500 Å	continuum	photosphere	3.7
1700 Å	continuum	temperature minimum, photosphere	3.7
304 Å	He II	chromosphere, transition region	4.7
1600 Å	C IV + cont.	transition region, upper photosphere	5.0
171 Å	Fe IX	quiet corona, upper transition region	5.8
193 Å	Fe XII, XXIV	corona and hot flare plasma	6.2, 7.3
211 Å	Fe XIV	active-region corona	6.3
335 Å	Fe XVI	active-region corona	6.4
94 Å	Fe XVIII	flaring corona	6.8
131 Å	Fe VIII, XXI	transition region, flaring corona	5.6, 7.0



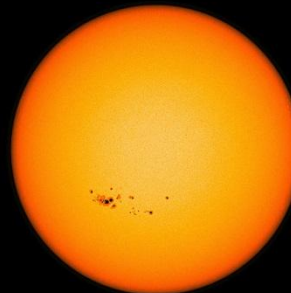
Czułość spektralna AIA (Szenicer et al., 2010)



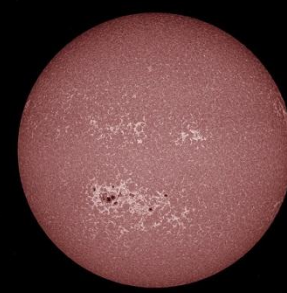
HMI Dopplergram
Surface movement
Photosphere



HMI Magnetogram
Magnetic field polarity
Photosphere

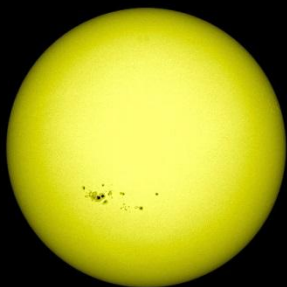


HMI Continuum
Matches visible light
Photosphere

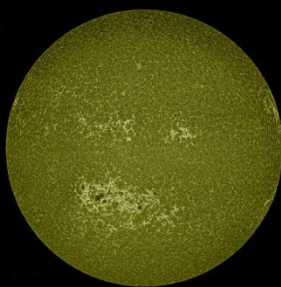


AIA 1700 Å
4500 Kelvin
Photosphere

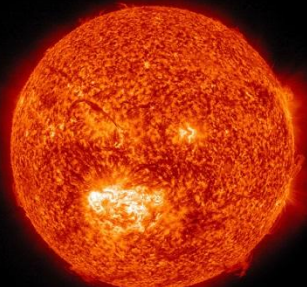
Porównanie obrazów AIA i HMI dla tego samego momentu czasu.



AIA 4500 Å
6000 Kelvin
Photosphere



AIA 1600 Å
10,000 Kelvin
Upper photosphere/
Transition region



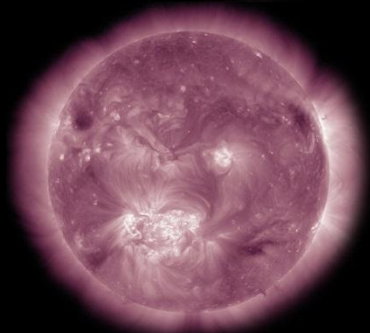
AIA 304 Å
50,000 Kelvin
Transition region/
Chromosphere



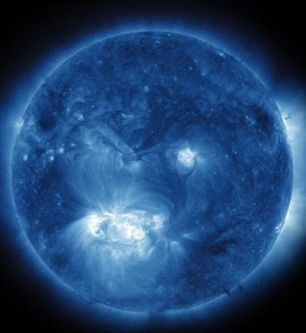
AIA 171 Å
600,000 Kelvin
Upper transition
Region/quiet corona



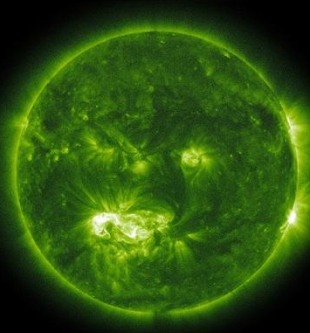
AIA 193 Å
1 million Kelvin
Corona/flare plasma



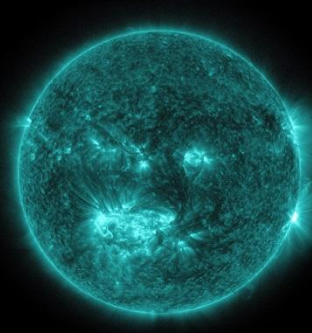
AIA 211 Å
2 million Kelvin
Active regions



AIA 335 Å
2.5 million Kelvin
Active regions



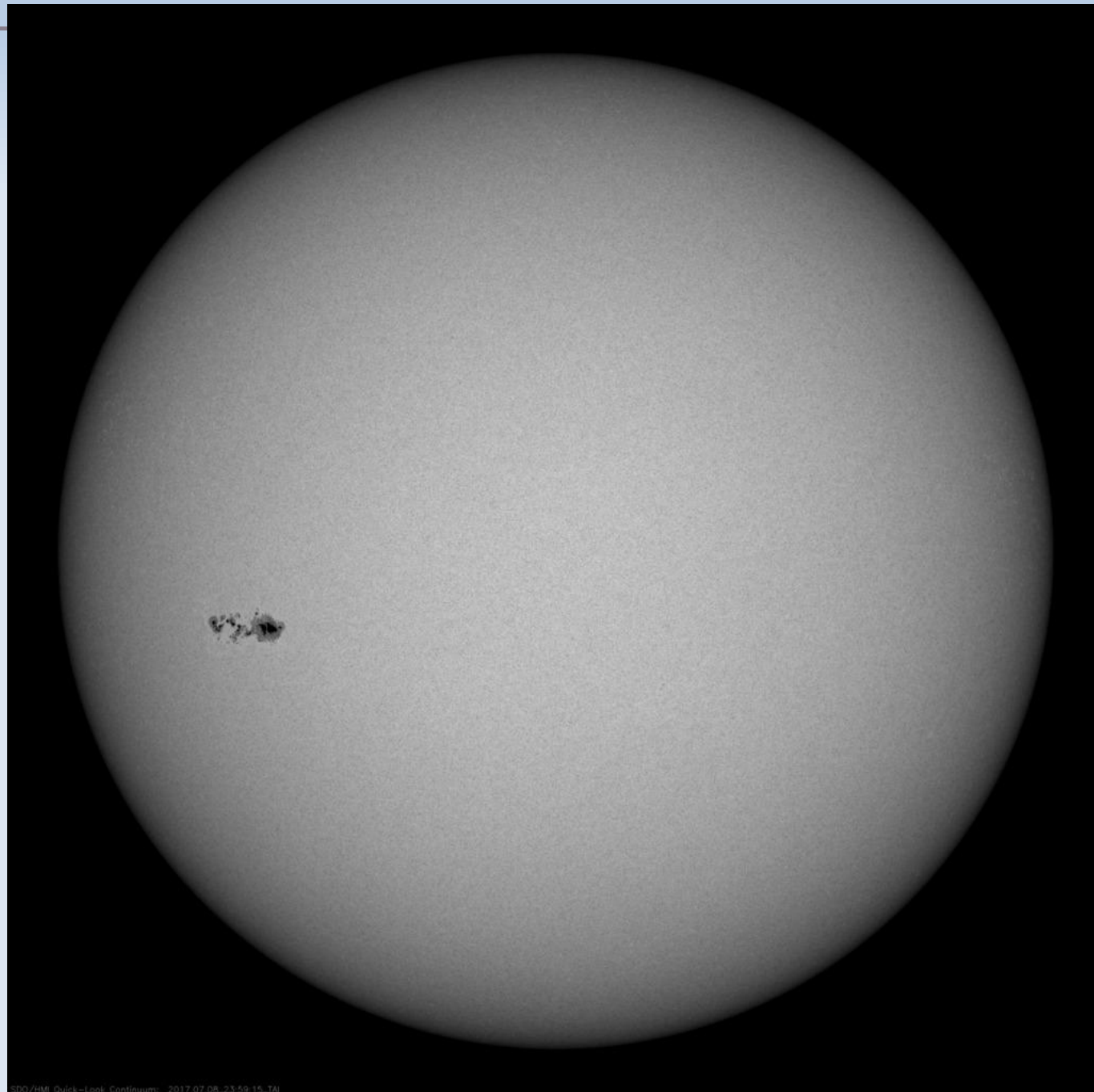
AIA 094 Å
6 million Kelvin
Flaring regions



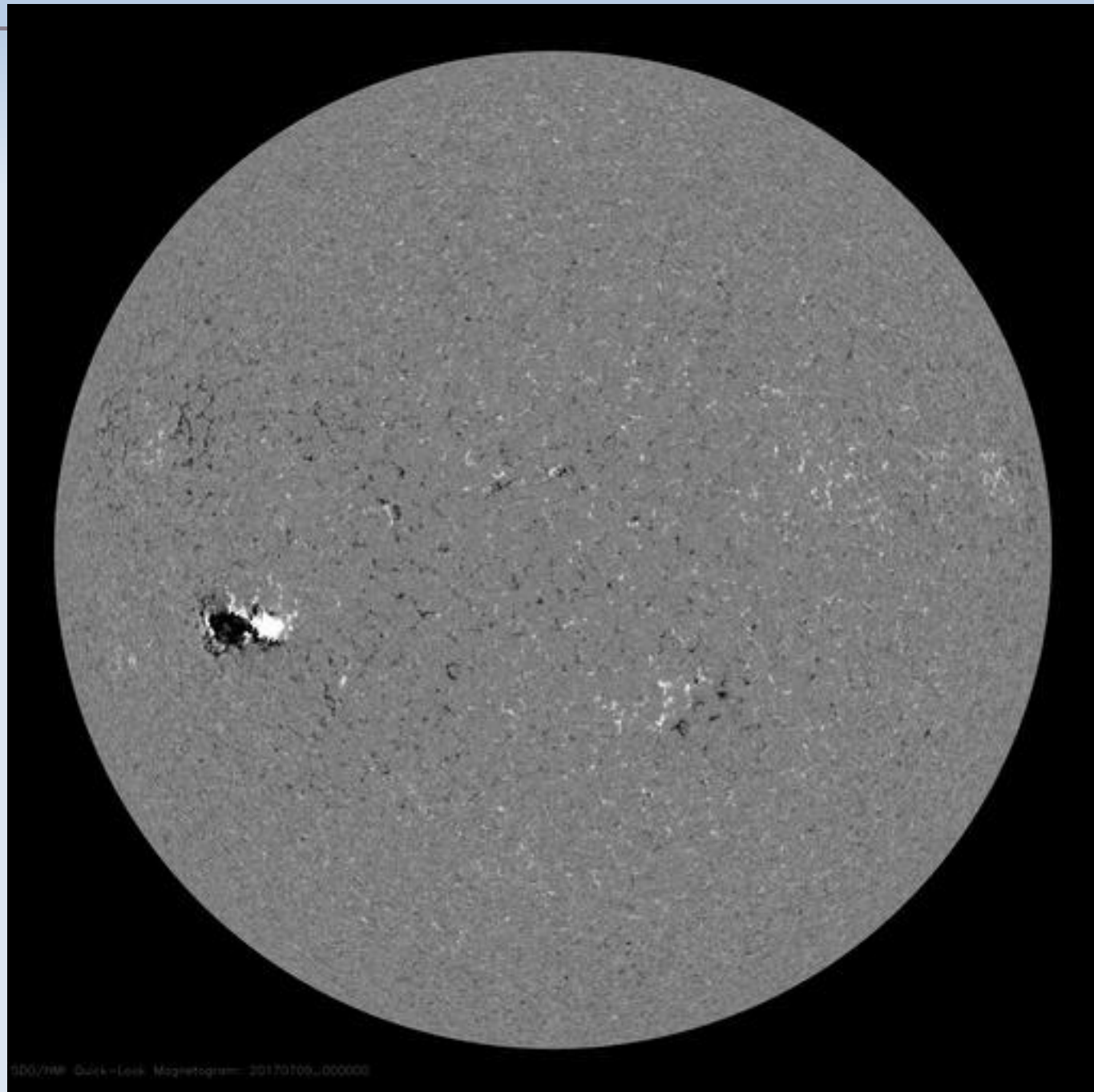
AIA 131 Å
10 million Kelvin
Flaring regions

Kolejne slajdy: porównanie obrazów AIA i HMI dla tego samego momentu czasu i sytuacji braku rozbłysku.

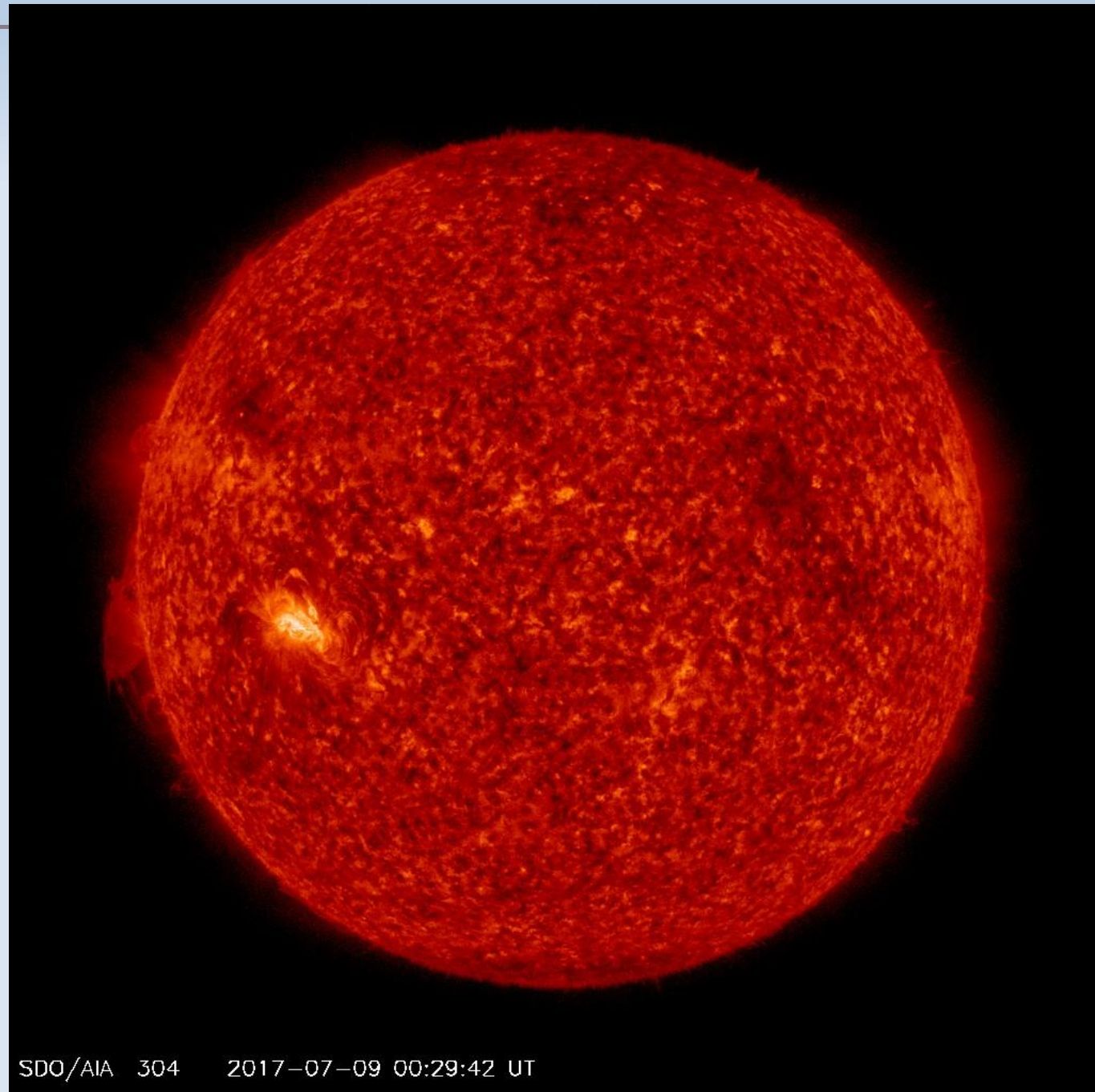
HMI continuum



HMI magnetogram

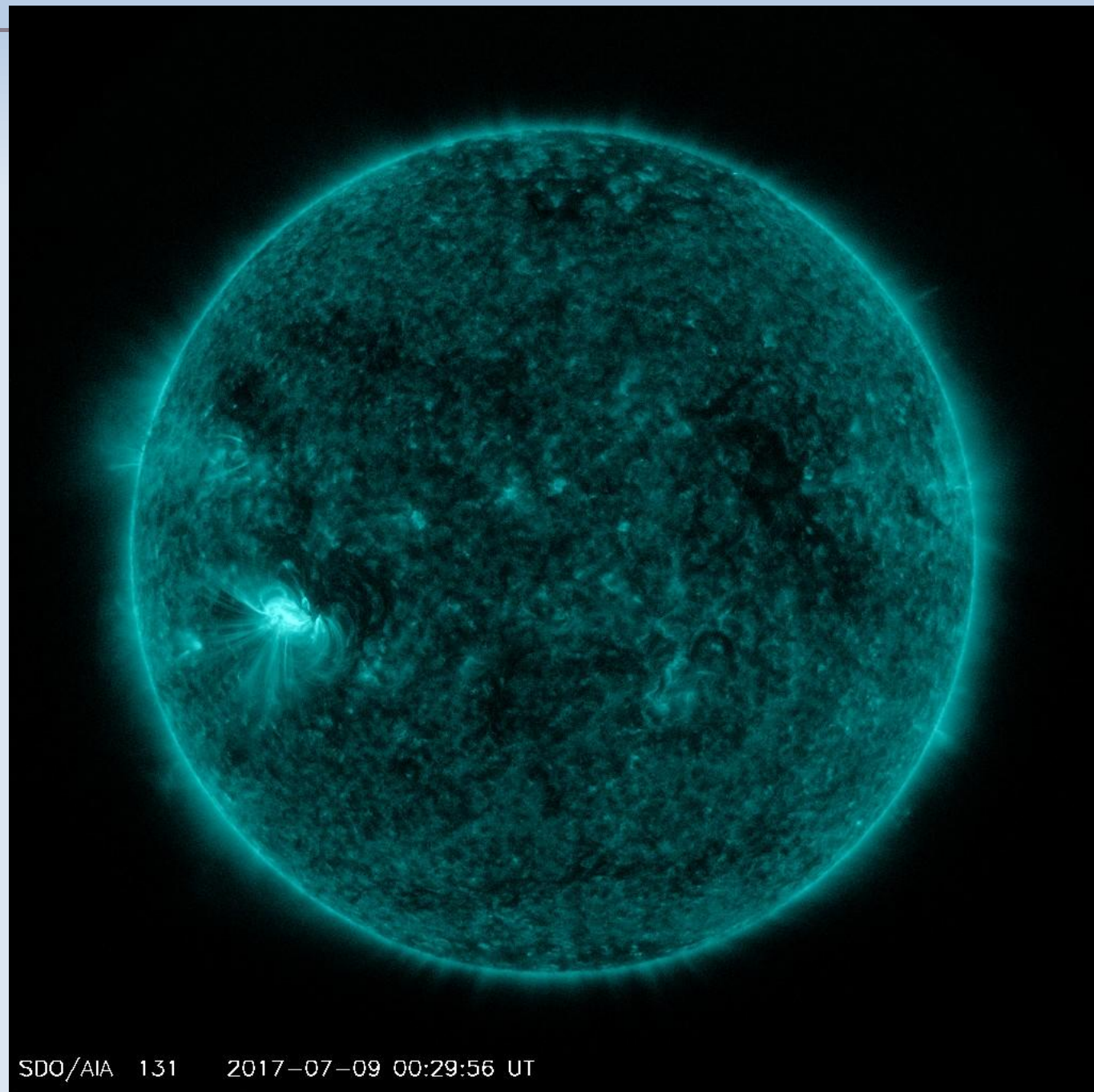


AIA 304
He II
50 000 K



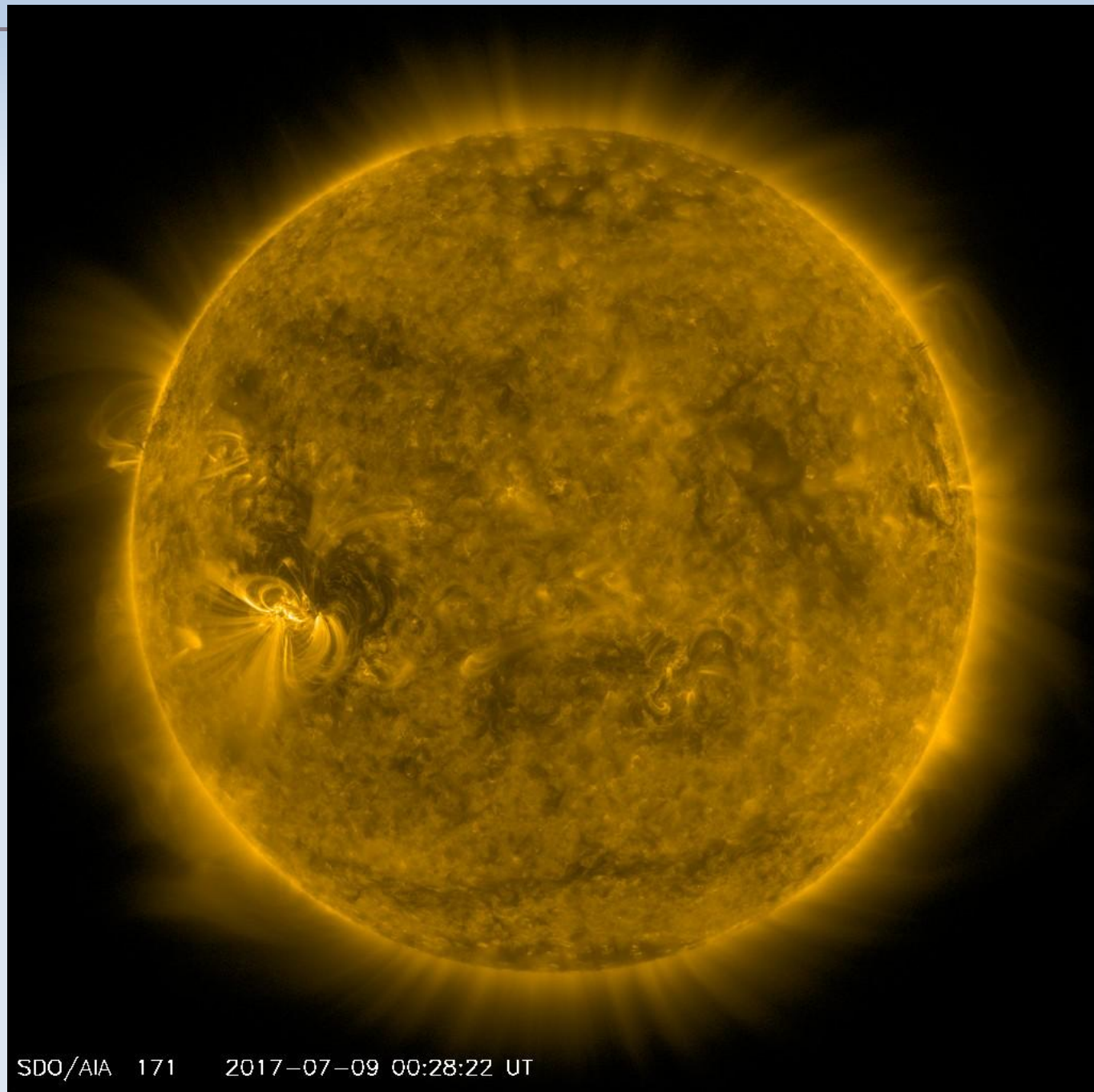
SDO/AIA 304 2017-07-09 00:29:42 UT

AIA 131
Fe VIII
500 000 K

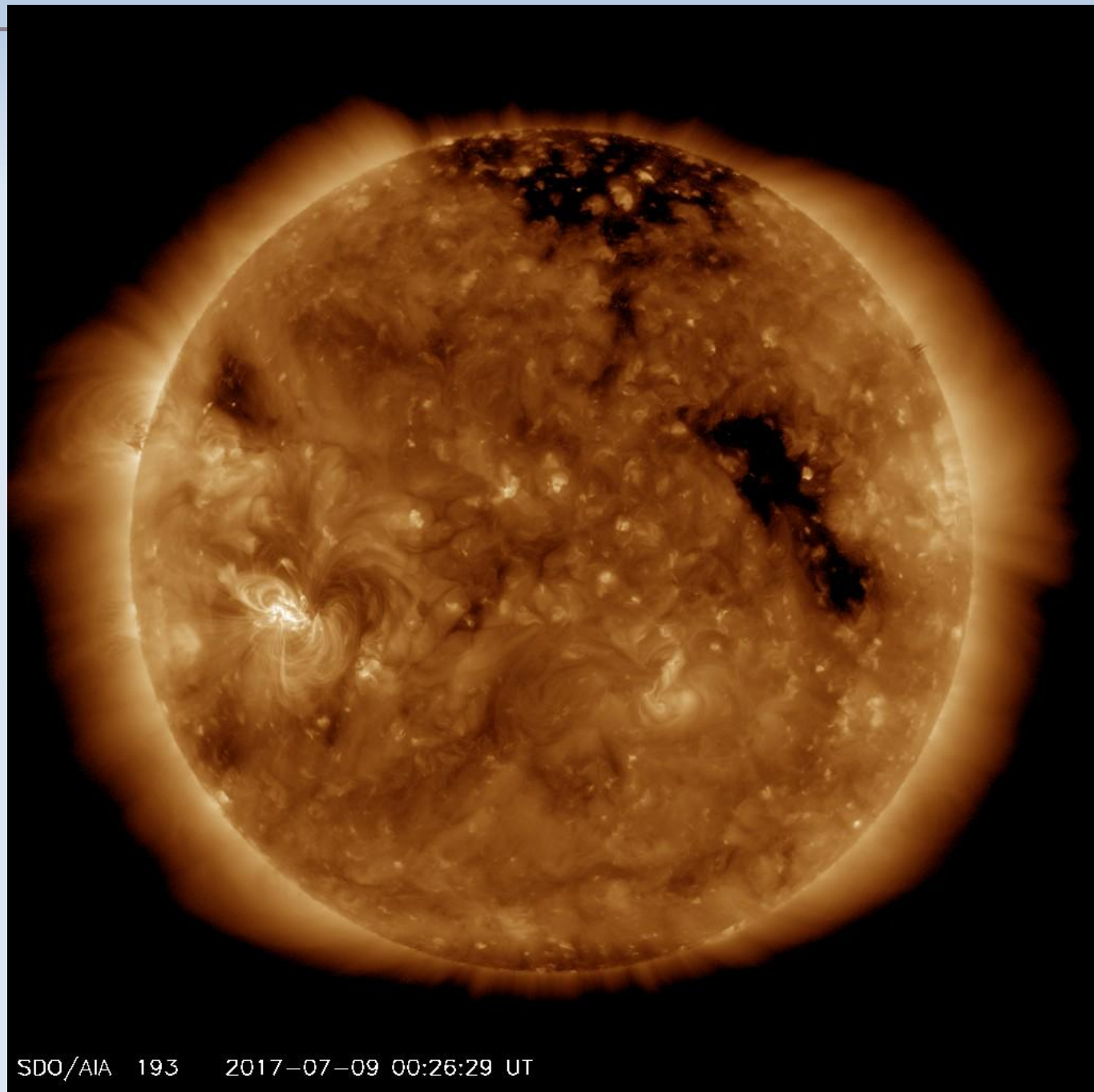


SDO/AIA 131 2017-07-09 00:29:56 UT

AIA 171
Fe IX
800 000 K

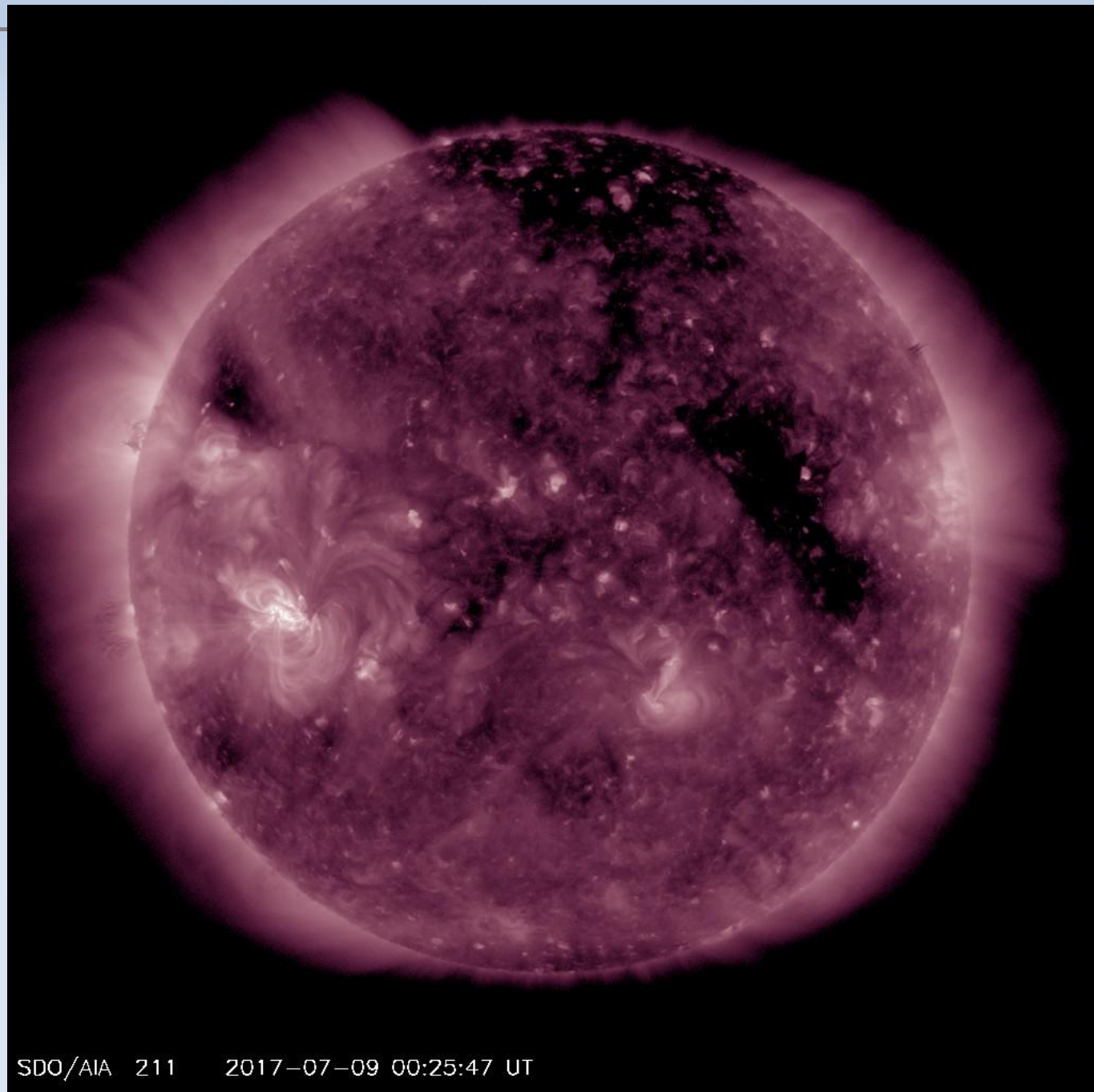


AIA 193
Fe XII
1 200 000 K



SDO/AIA 193 2017-07-09 00:26:29 UT

AIA 211
Fe XIV
2 000 000 K

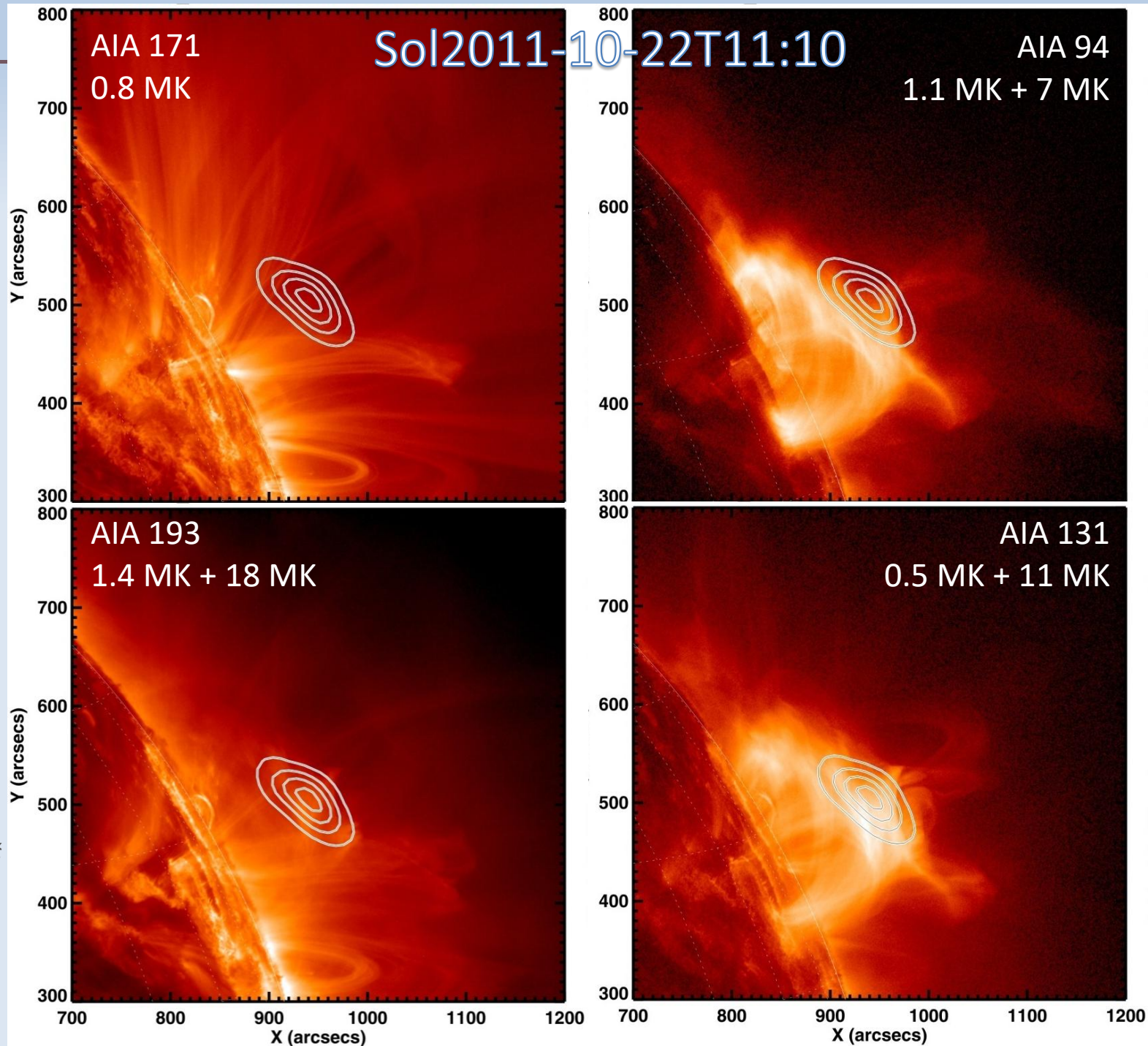


SDO/AIA 211 2017-07-09 00:25:47 UT

10:50 UT

SDO/AIA
(obraz)
+
RHESSI
9-10 keV
(izolinie)

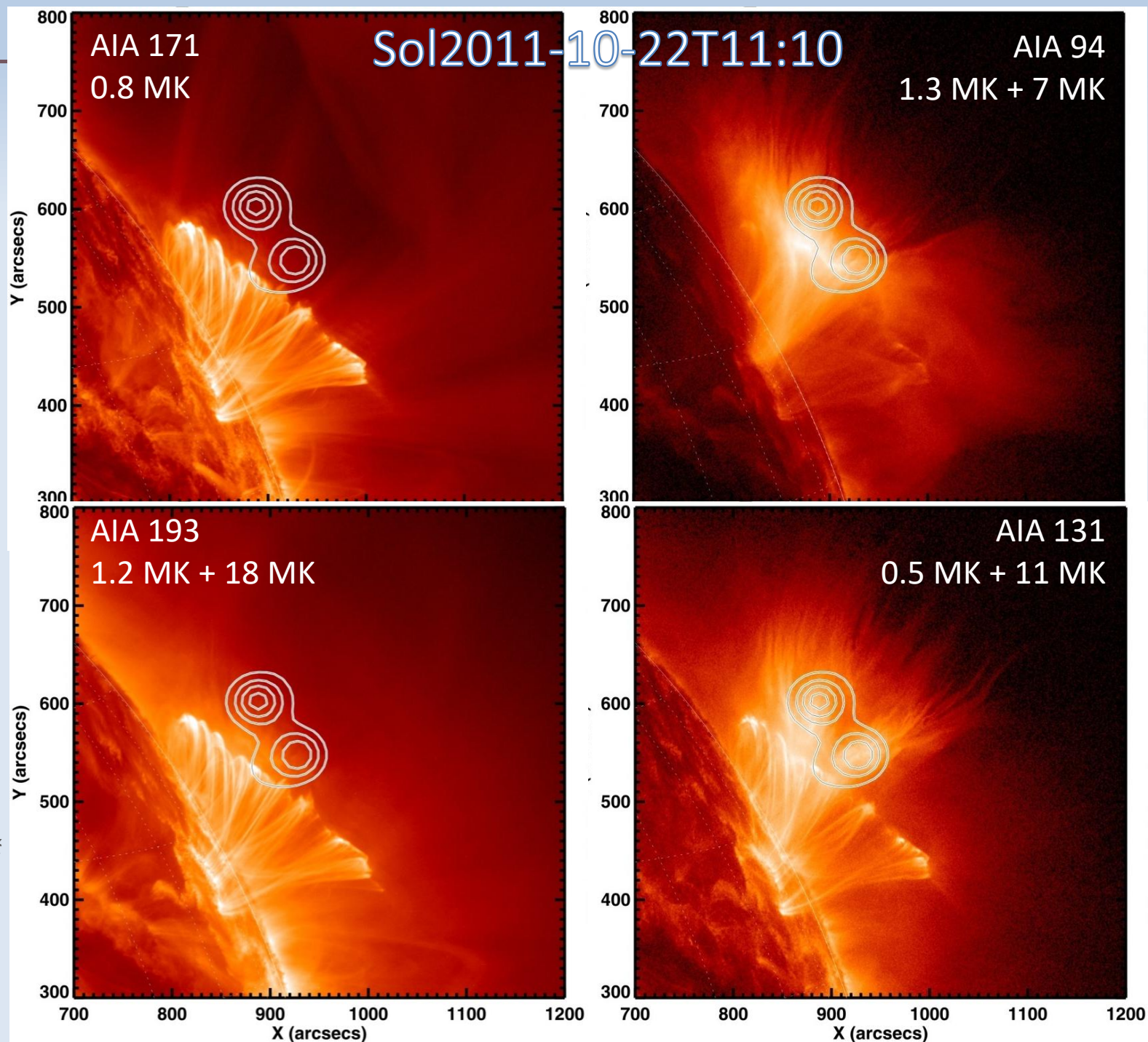
Porównanie obrazów AIA (4 pasma) i teleskopu RHESSI (9-10 keV) dla tego samego momentu czasu podczas rozbłysku. W pasmach 94 i 131 widoczna jest gorąca plazma rozbłyskowa (~10 mln K). Widać ją też na obrazie RHESSI. Nie widać jej w pasmach 171 i 193*



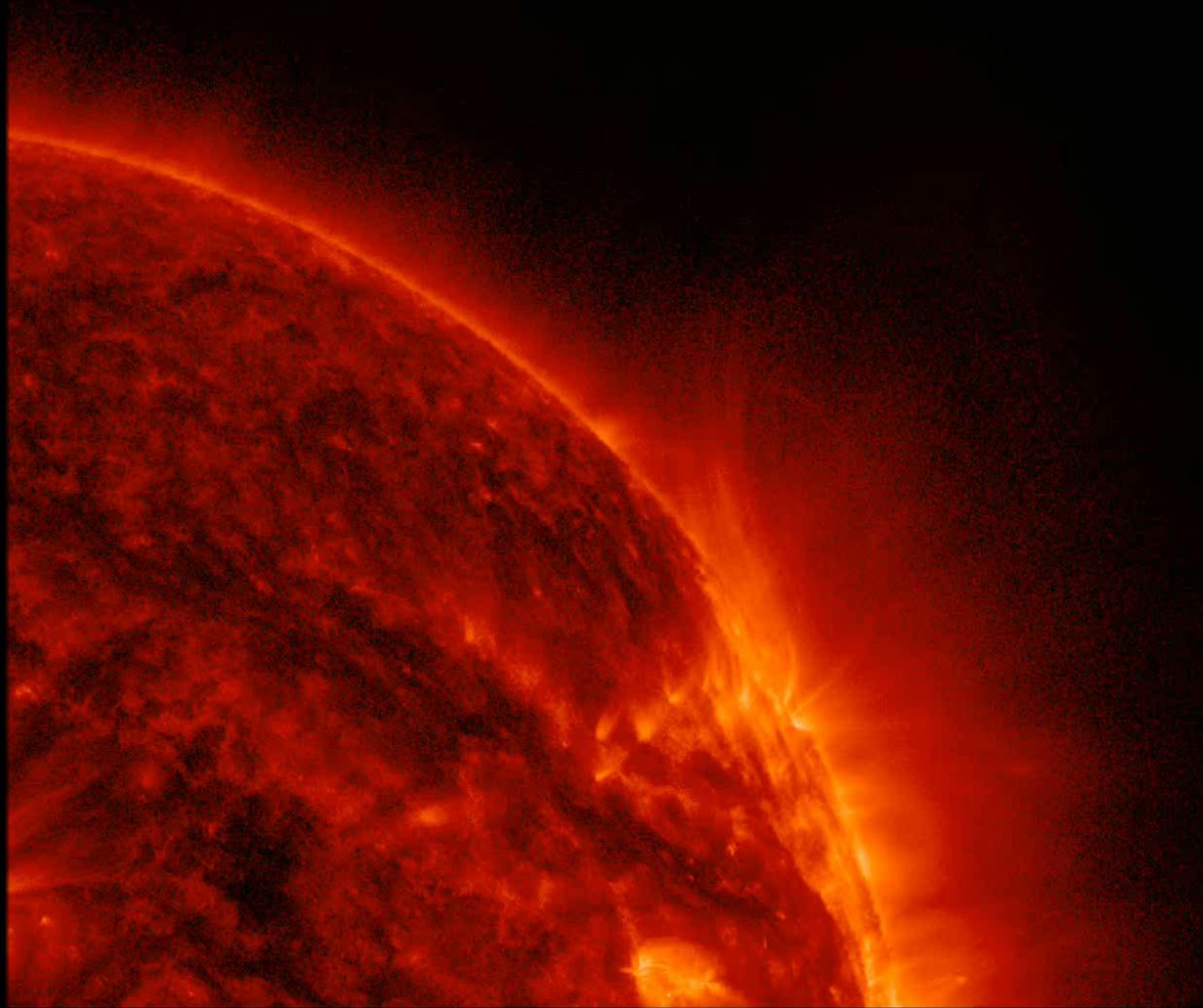
13:37 UT

SDO/AIA
(obraz)
+
RHESSI
8-9 keV
(izolinie)

*Porównanie obrazów AIA
(4 pasma) i teleskopu
RHESSI (8-9 keV) dla tego
samego momentu czasu
podczas rozbłysku.
W pasmach 94 i 131
widoczna jest gorąca
plazma rozbłyiskowa (~10
mln K). Widać ją też na
obrazie RHESSI. Nie widać
jej w pasmach 171 i 193*



Sol2011-10-22T11:10



AIA 131 - 2011/10/22 - 08:00:33Z



Solar Orbiter: EUI, STIX

instrumenty

Misja ESA/NASA

Start: luty 2020, asysty grawitacyjne (Ziemia, Wenus)

Pierwsza orbita naukowa: połowa 2022

Nominalny czas trwania misji: 7 lat (+3 lata)

Orbita heliocentryczna, min. peryhelium: 0.28 AU, max. inklinacja orbity: 25° (faza nominalna, 7 lat),
34° – 36° (faza rozszerzona, 3 lata)

Masa startowa: 1800 kg

Aparatura naukowa: 209 kg (10 instrumentów)

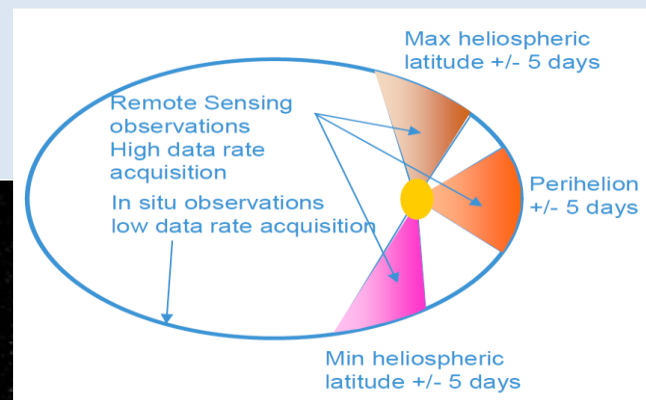
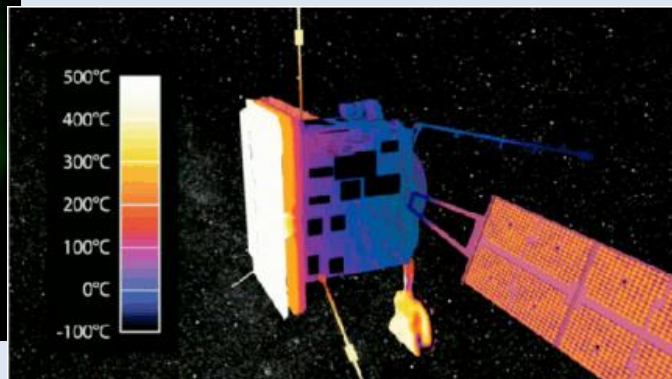
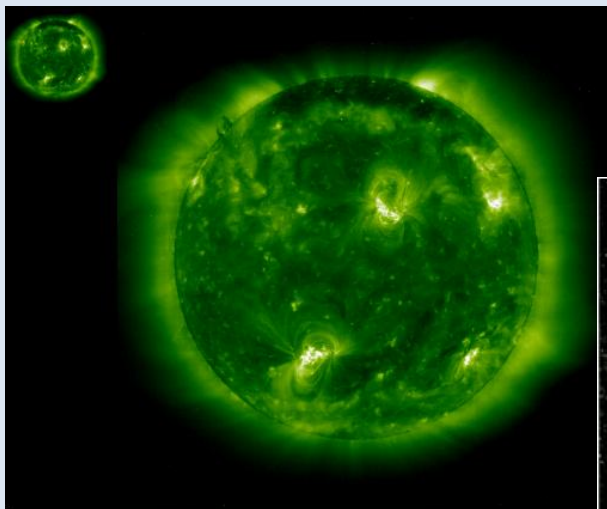
Wymiary: 2.5 x 3.1 x 2.7 m

Długość rozłożonych paneli słonecznych: 18 m

Zasilanie: 180 W

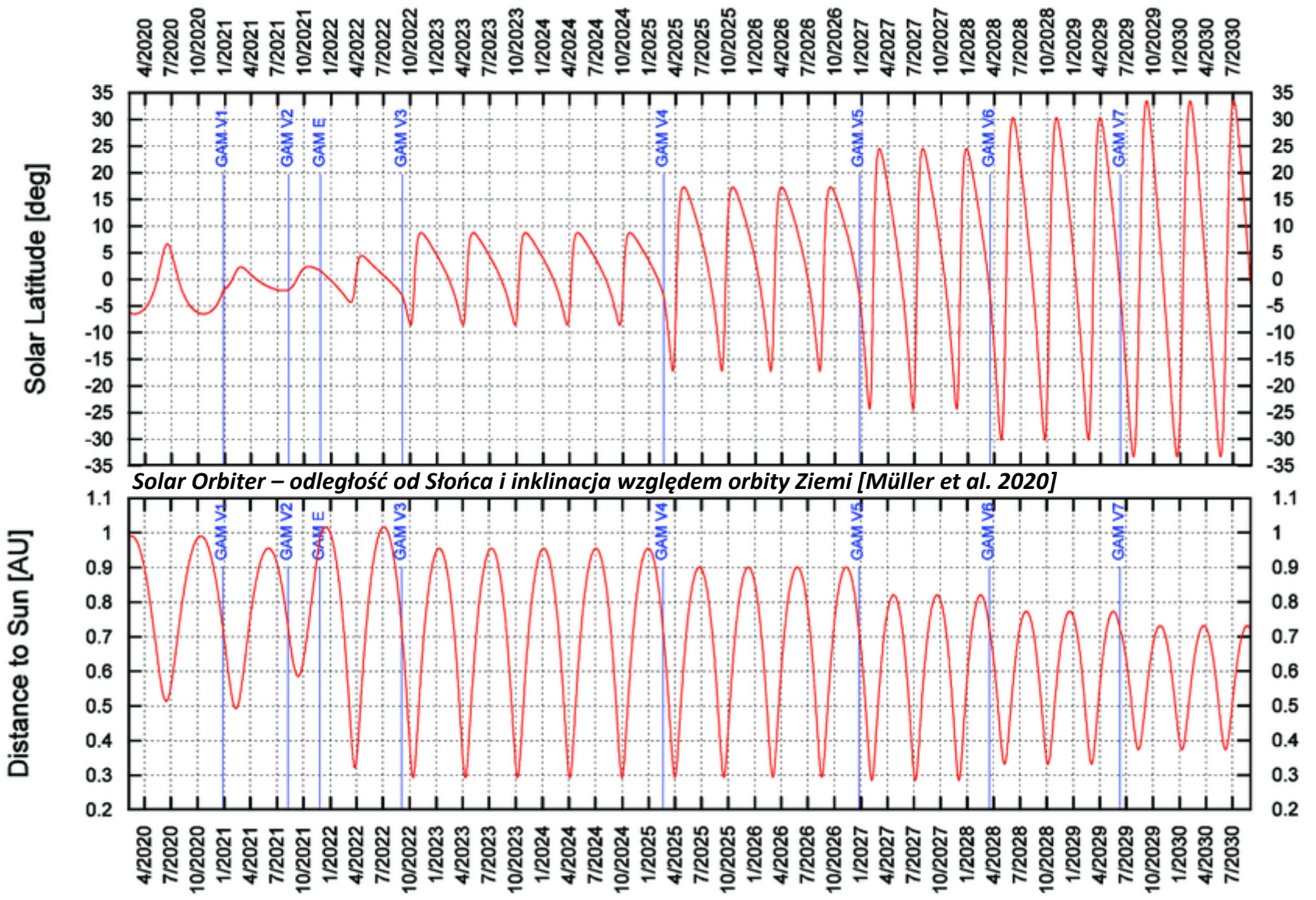
Transfer danych: 150 kbit/s (odległość 1 AU od Ziemi), okna obserwacyjne

Ważna zaleta: poprawa rozdzielczości przestrzennej przy obecnie dostępnej rozdzielczości kątowej



Misja ESA/NASA

Sta
Pie
No
Ork
34°
Ma
Ap
Wy
Dł
Zas
Tra
Wa



teric
days

erihelion
/- 5 days



Pytania naukowe misji:

- Co napędza wiatr słoneczny i skąd pochodzi koronalne pole magnetyczne?
- Jak zjawiska aktywne wpływają na zmienność heliosfery?
- Jak erupcje słoneczne produkują wysokoenergetyczne cząstki wypełniające heliosferę?
- Jak działa dynamo słoneczne i jak steruje związkami Słońca i heliosfery?

Instrumenty badawcze (in-situ):

SWA: Solar Wind Plasma Analyser

Konstrukcja: Wielka Brytania, Włochy, Francja, USA

Cel: pomiar gęstości, prędkości i temperatury wiatru słonecznego (jony i elektrony); skład chemiczny.

MAG: Magnetometer

Konstrukcja: Wielka Brytania

Cel: precyzyjny pomiar heliosferycznego pola magnetycznego.

RPW: Radio and Plasma Waves

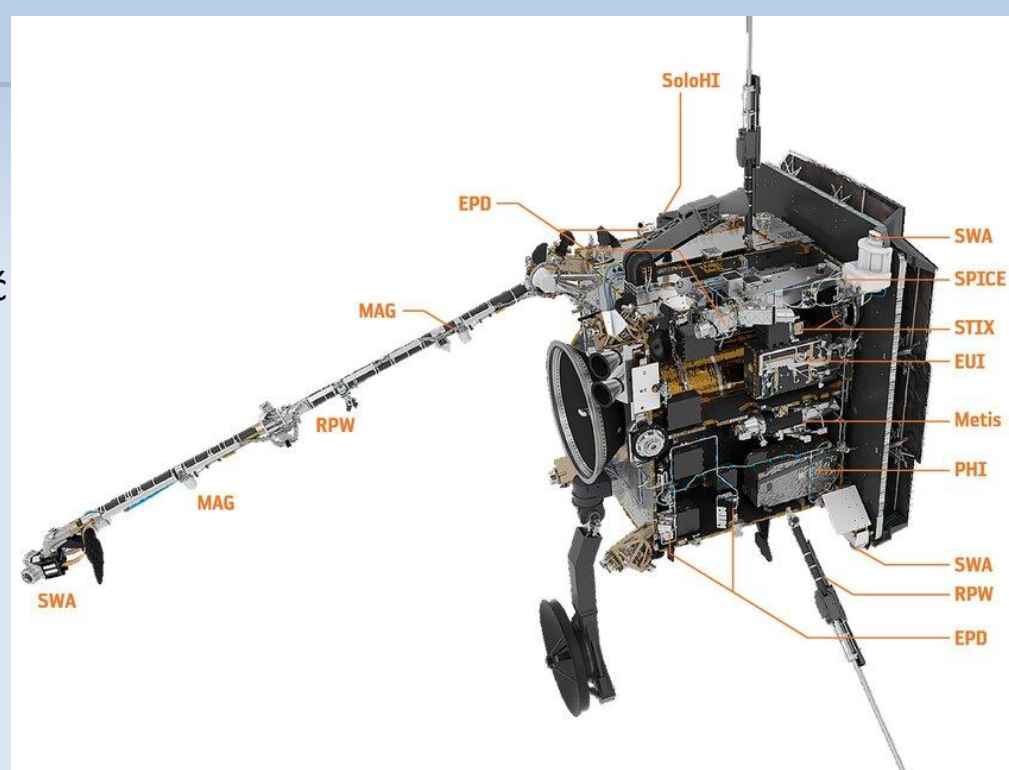
Konstrukcja: Francja, Szwecja, Czechy, Austria

Cel: pomiar pól magnetycznych i elektrycznych z wysoką rozdzielczością czasową.

EPD: Energetic Particle Detector

Konstrukcja: Hiszpania, Niemcy, USA, ESA

Cel: pomiar składu, zmian w czasie i widm wysokoenergetycznych cząstek.



instrumenty

Instrumenty badawcze (remote):

EUI: Extreme Ultraviolet Imager

Konstrukcja: Belgia, Wielka Brytania, Francja, Niemcy, Szwajcaria

Cel: Uzyskanie sekwencji obrazów w zakresie UV

PHI: Polarimetric and Helioseismic Imager

Konstrukcja: Niemcy, Hiszpania, Francja

Cel: Pomiar fotosferycznego pola magnetycznego i prędkości dopplerowskich.

SPICE: Spectral Imaging of the Coronal Environment

Konstrukcja: Wielka Brytania, Niemcy, Francja, Szwajcaria, USA

Cel: Spektroskopia korony z obrazów EUV

SoloHI: Heliospheric Imager

Konstrukcja: USA

Cel: Obrazowanie obszaru 5-47 $R_{\odot}$

METIS: Coronagraph

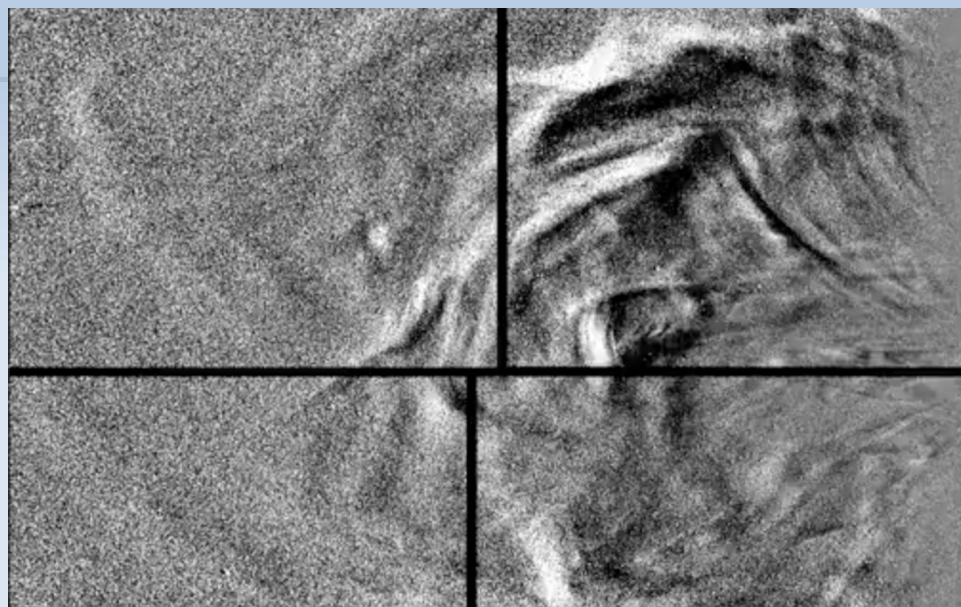
Konstrukcja: Włochy, Niemcy, Czechy

Cel: Obrazowanie korony (1.5 – 3 $R_{\odot}$)

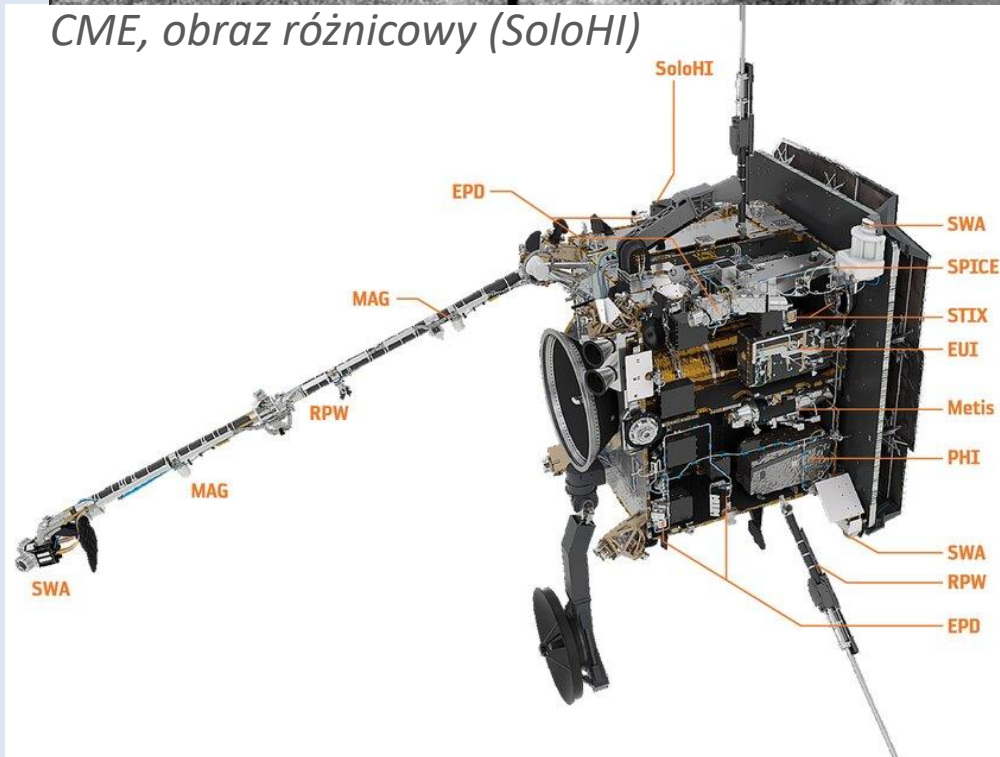
STIX: X-ray Spectrometer/Telescope

Konstrukcja: Szwajcaria, Polska, Niemcy, Czechy, Francja

Cel: Rejestrowanie widm i obrazów w zakresie 4-150 keV

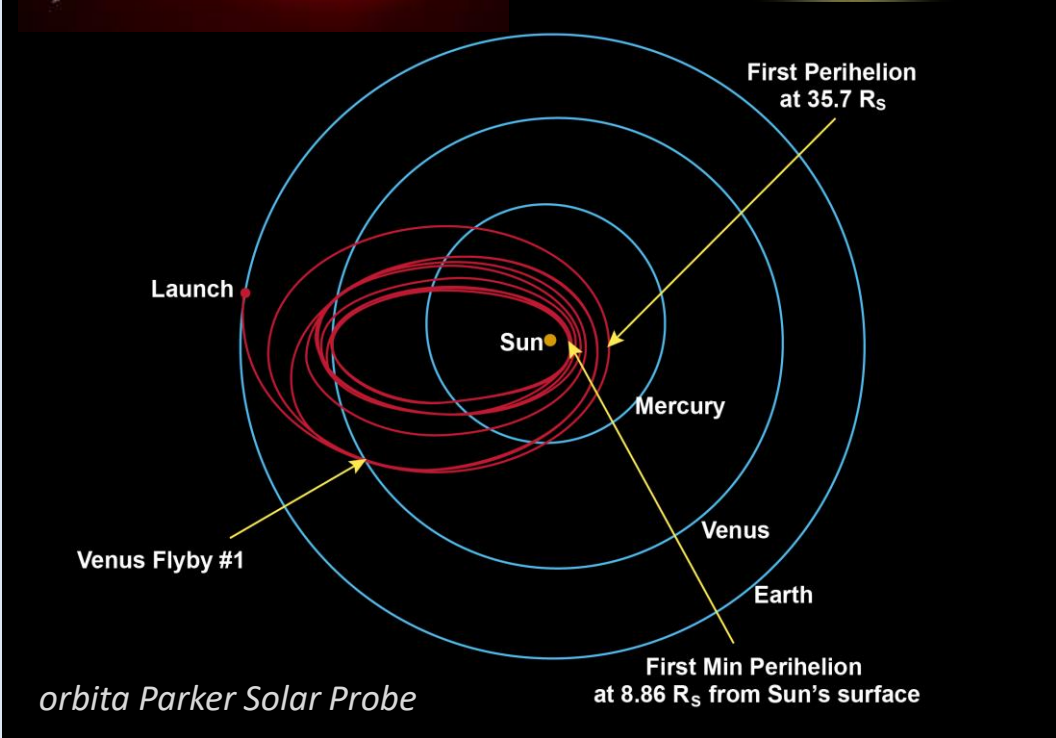
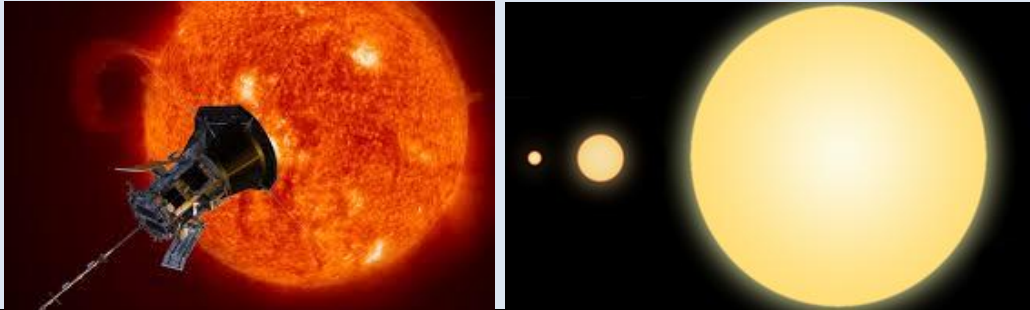


CME, obraz różnicowy (SoloHI)





	Helios-1	Helios-2	Parker Solar Probe
Start	10.12.1974	15.01.1976	12.08.2018
Koniec	18.02.1985	23.12.1979	2025 (plan)
Peryhelium	0.31 AU	0.29 AU	0.045 AU



sonda Helios-1

EUI: Extreme Ultraviolet Imager

Składa się z:

- High Resolution Imagers (HRIs)
- Full Sun Imager (FSI)

Układ optyczny: NI-ML

Filtry wąskopasmowe: 174 i 304 Å (FSI), 174 Å i Ly α (HRI)

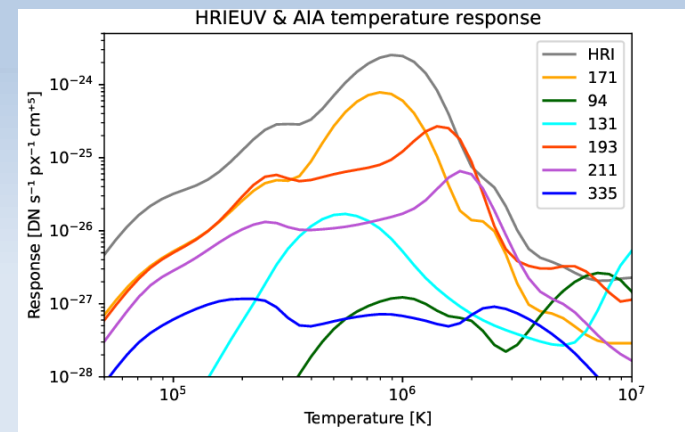
Pole widzenia: 3.8 deg (FSI), 0.28 deg (HRI)

Rozdzielczość: 10 arcsec (FSI), 0.5* arcsec (HRI)

Detektor: CMOS 3k/2k

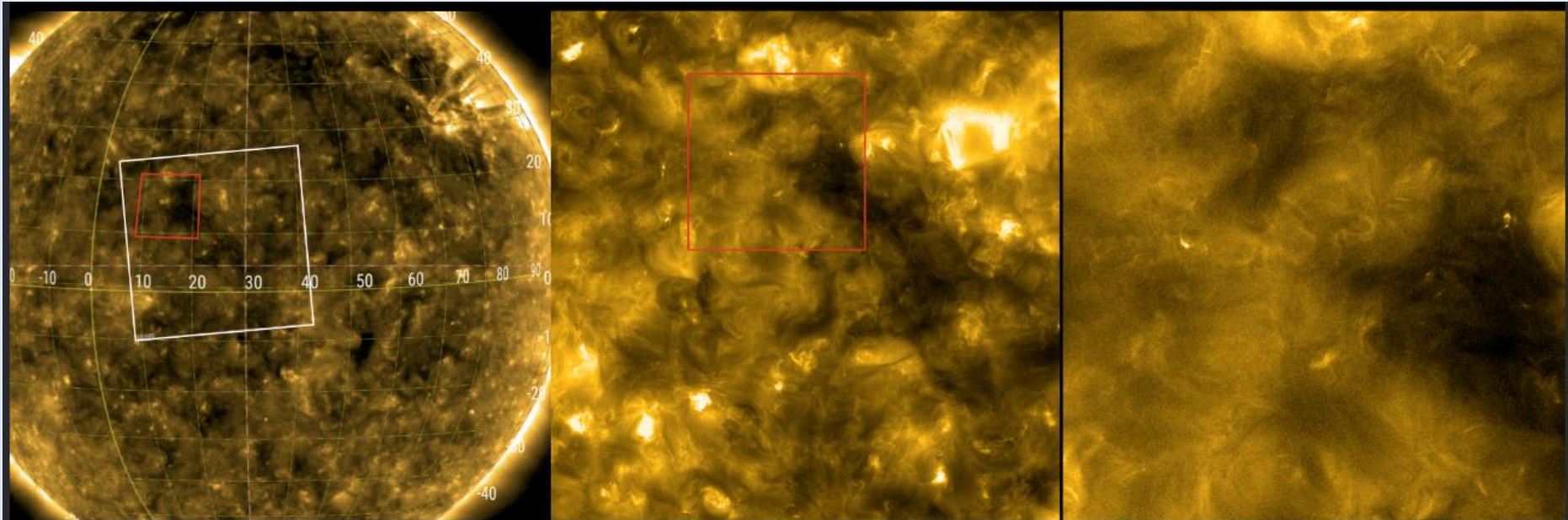
* ~100 km w peryhelium

*Odpowiedź termiczna
HRI174 oraz AIA
[Dolliou et al. 2023]*



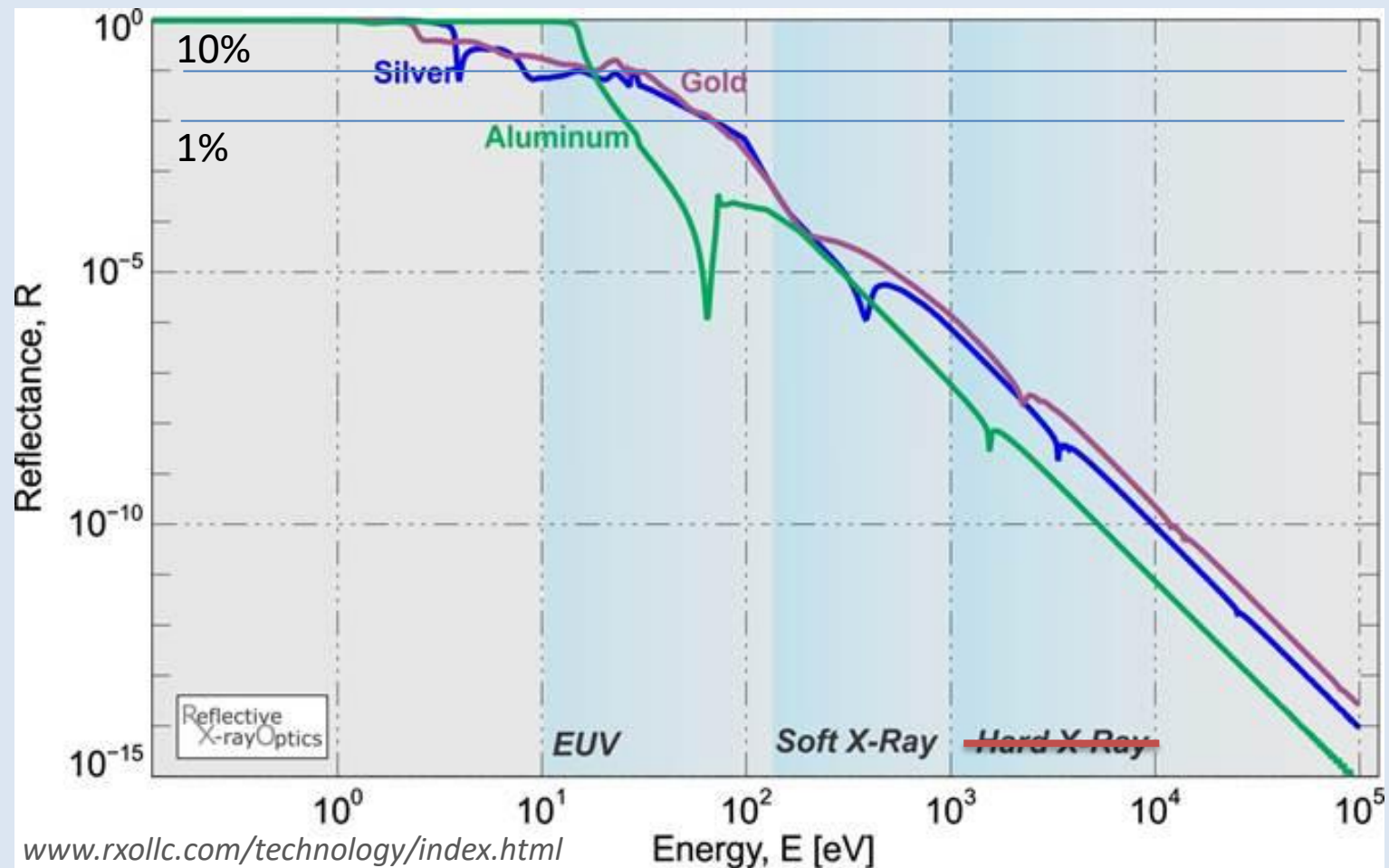
*Przykładowe obrazy z FSI i HRI
(174Å). Rejestracja małych pojaśnień
w niskiej koronie, tzw. „campfires”.
 $T \approx 1\text{MK}$, czas trwania $>10\text{s}$, lokalizacja
do 5000 km ponad fotosferą
[Berghmans et al. 2021]*

film do obejrzenia



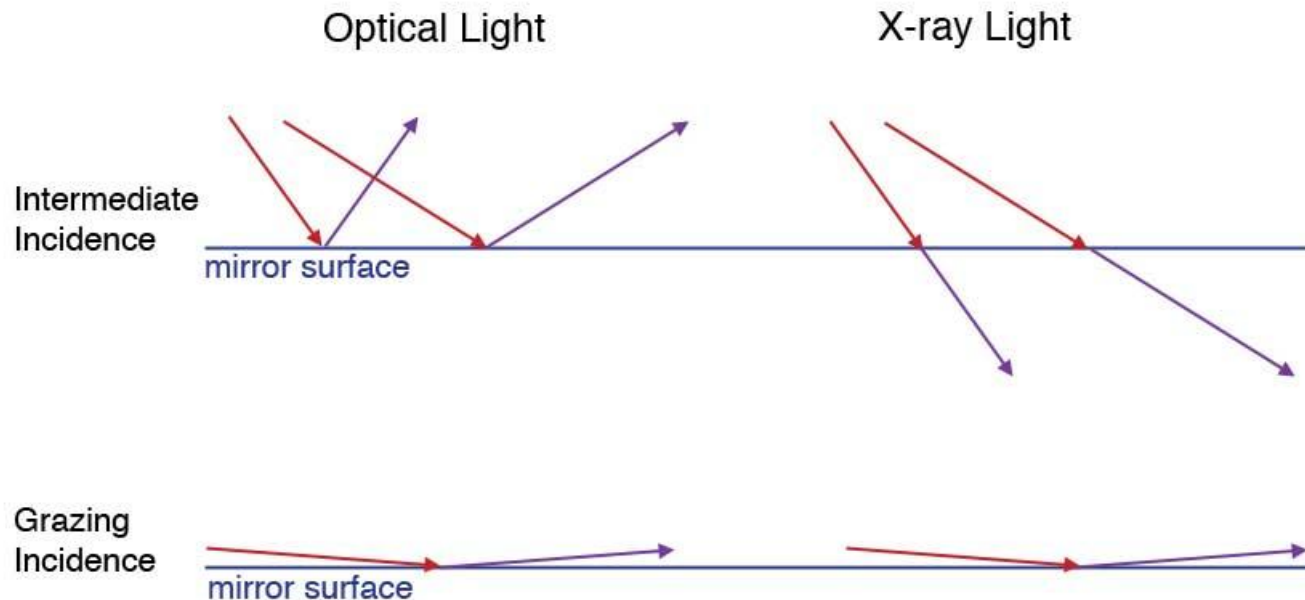
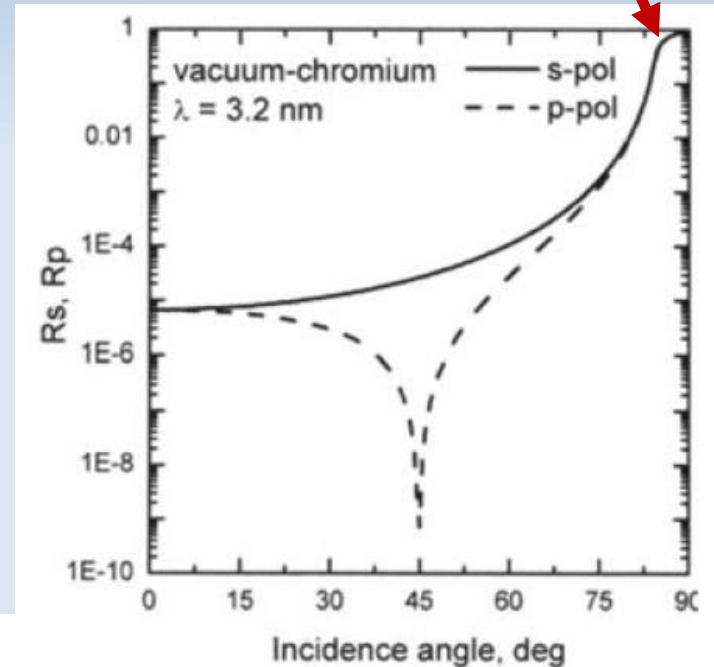
W zakresie XR zwykle odbicie od luster spada poniżej 1%.

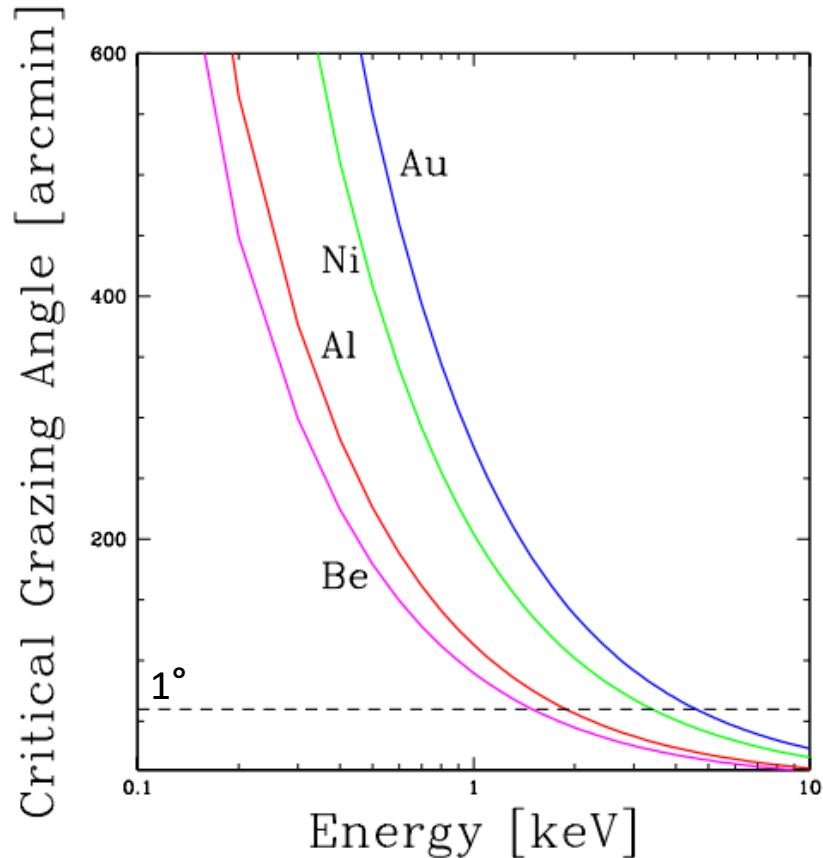
Optyka NI, nawet z użyciem luster wielowarstwowych, jest niewystarczająca do uzyskania obrazu



Odbicie (i ogniskowanie) promieniowania SXR możliwe jest tylko przy bardzo małych kątach padania, $< 2^\circ$ (grazing incidence, GI, „promienie ślizgające”, zjawisko całkowitego odbicia zewnętrznego)

Odbicie od granicy próżnia-chrom dla promieniowania $32 \text{ \AA}$ w zależności od kąta padania [Yulin 2003]





Całkowite odbicie zewnętrzne występuje dla kątów mniejszych niż kąt krytyczny θ_c , który zależy od:

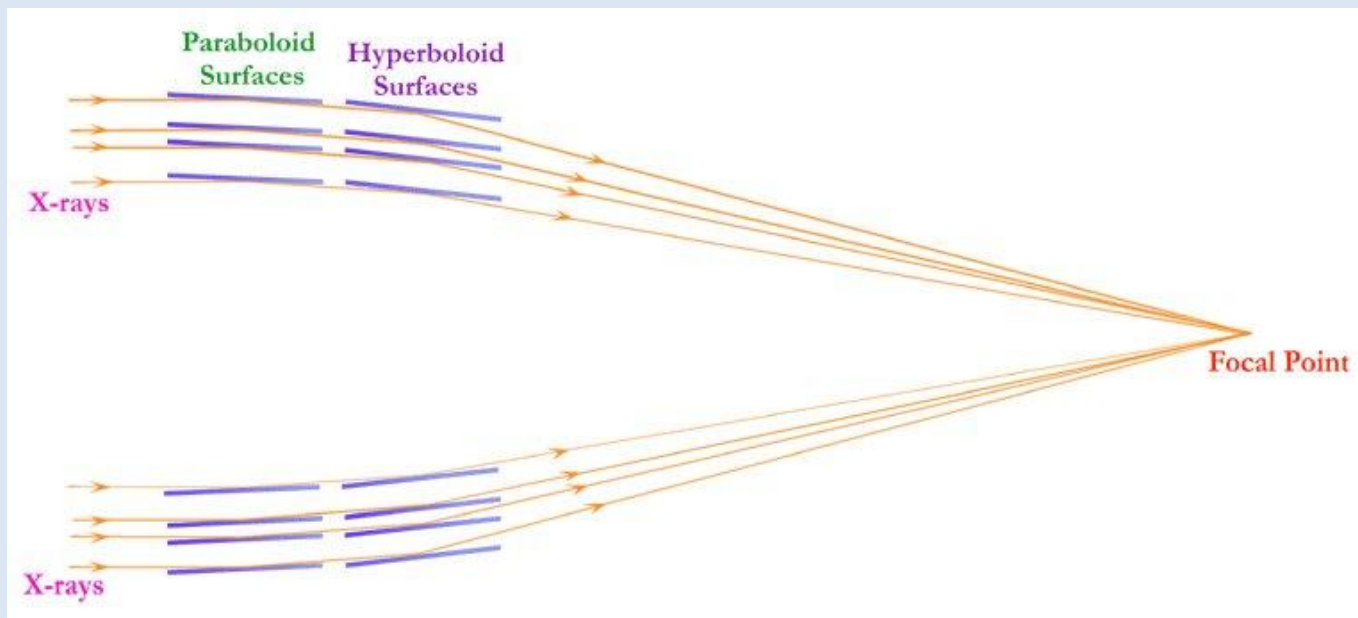
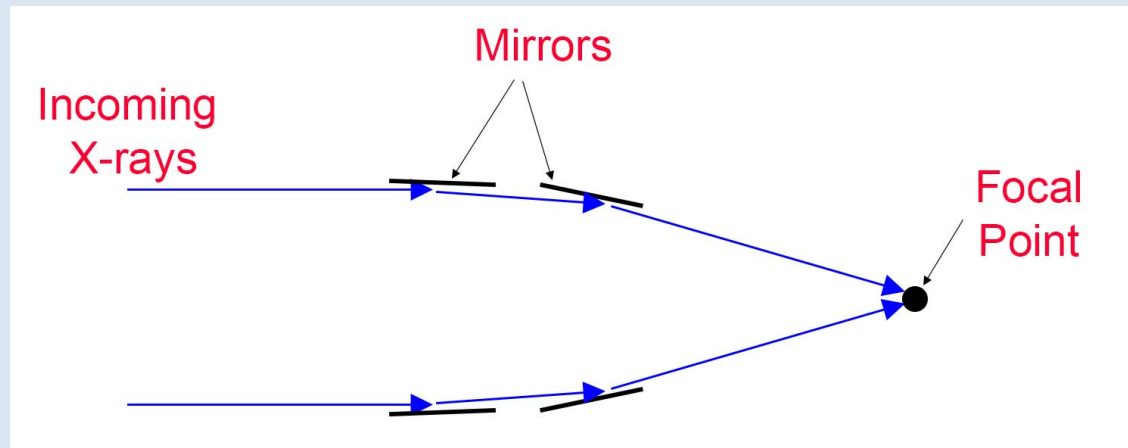
- energii fotonów
- materiału

$$\sin \theta_c = \lambda_{min} \left(\frac{Ne^2}{mc^2\pi} \right)^{1/2}$$

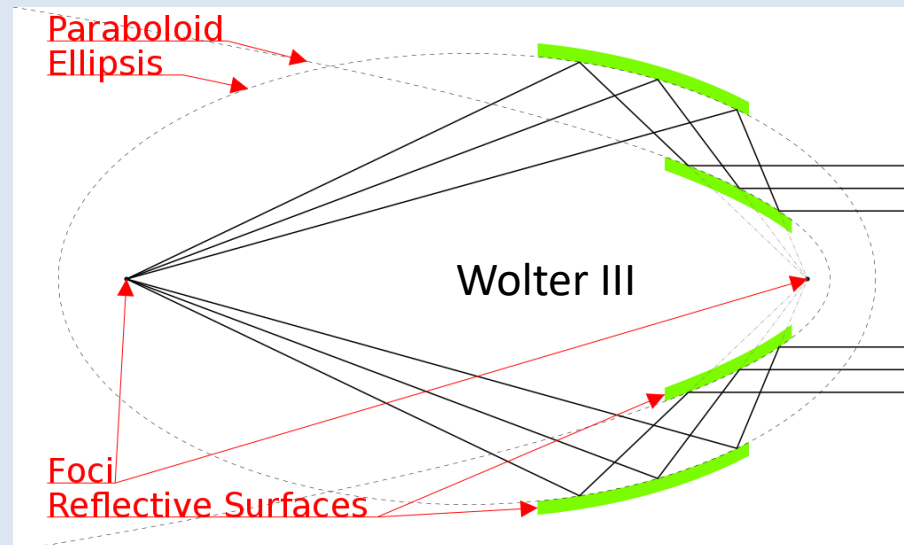
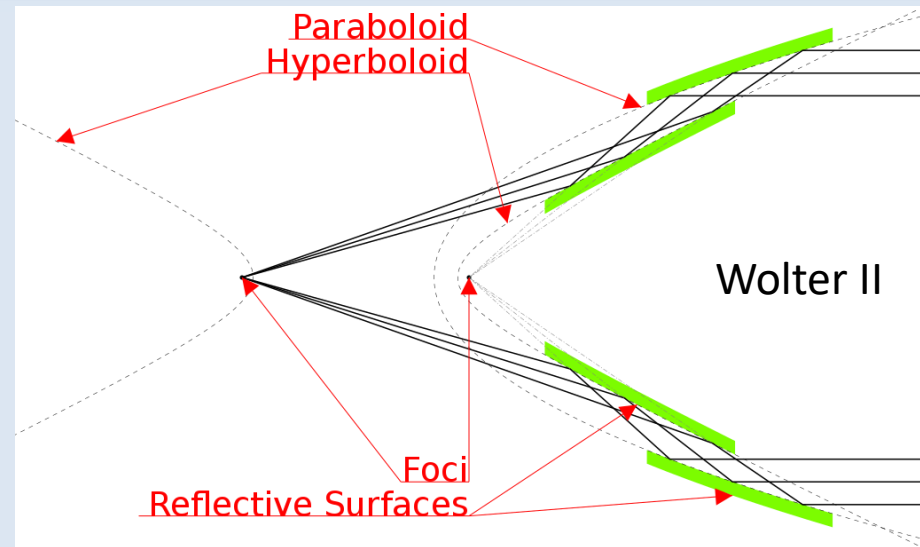
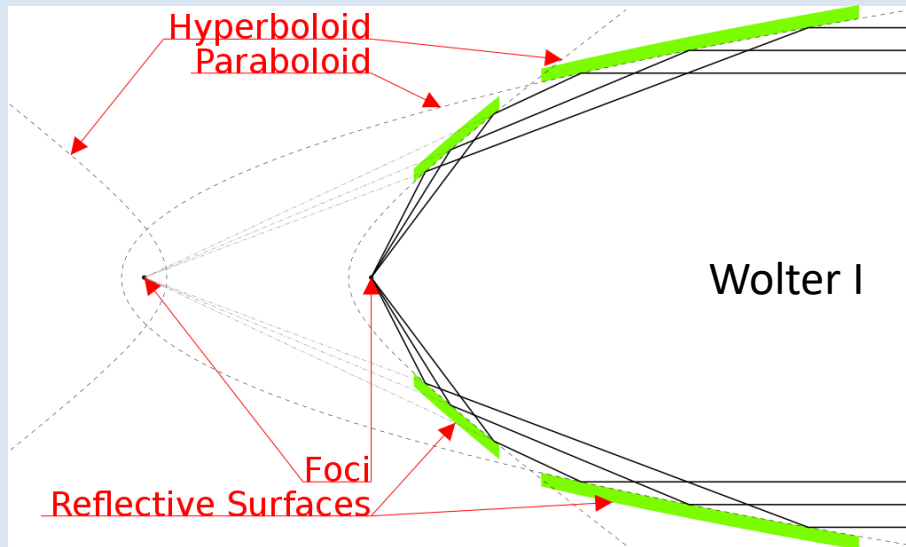
N – koncentracja elektronów,
m, e – masa i ładunek elektronu
 λ_{min} - dł. fali odpowiadająca θ_c

Dla fotonów SXR, nawet w przypadku najgęstszych materiałów (złoto, platyna, iryd), kąt padania musi być na poziomie 0.2-2°.

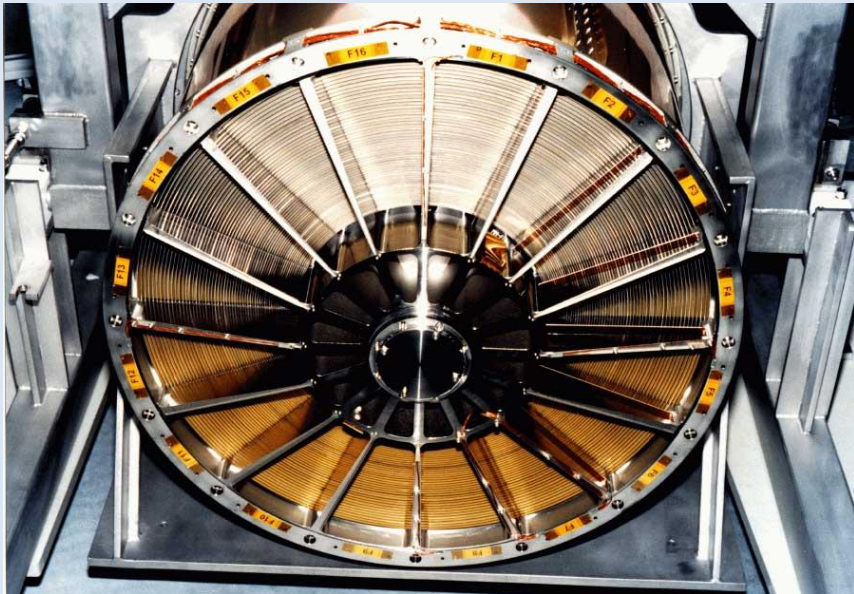
Do otrzymania obrazu bez komy potrzebne są dwa odbicia (para luster).
Zagnieżdżanie takich par pozwala zwiększyć powierzchnię efektywną teleskopu.



Układ optyczny (teleskop) Woltera wykorzystuje zjawisko ślizgających promieni i występuje w trzech odmianach



Teleskop rentgenowski XMM-Newton
z optyką Wolter I



Wybrane satelitarne obserwatoria SXR

Yohkoh, teleskop SXT (Soft X-ray Telescope)

Układ optyczny: GI

Zakres: 0.24 – 4.6 nm (SXR)

Filtry szerokopasmowe, 1-3 nm

Pole widzenia 42x42 arcmin

Rozdzielczość: 2.4 arcsec/px

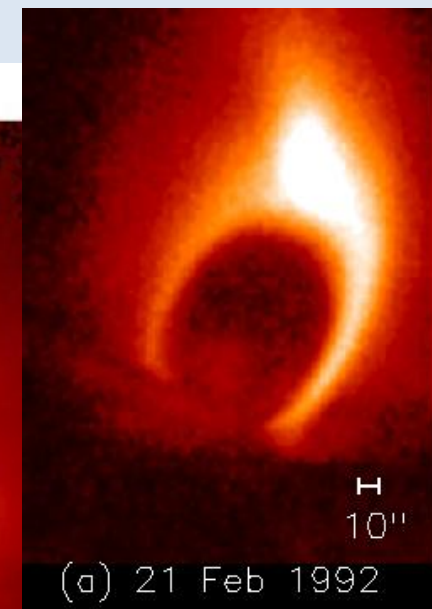
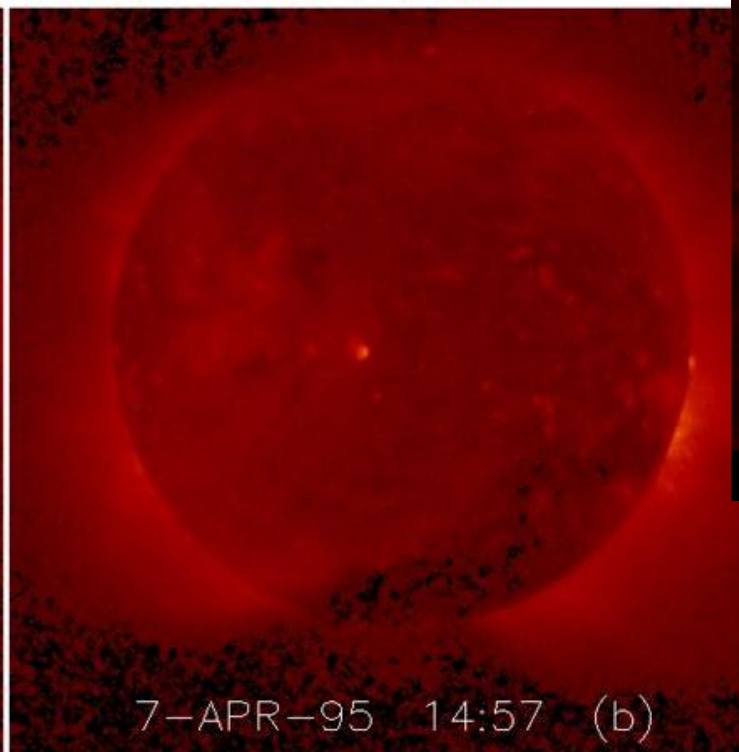
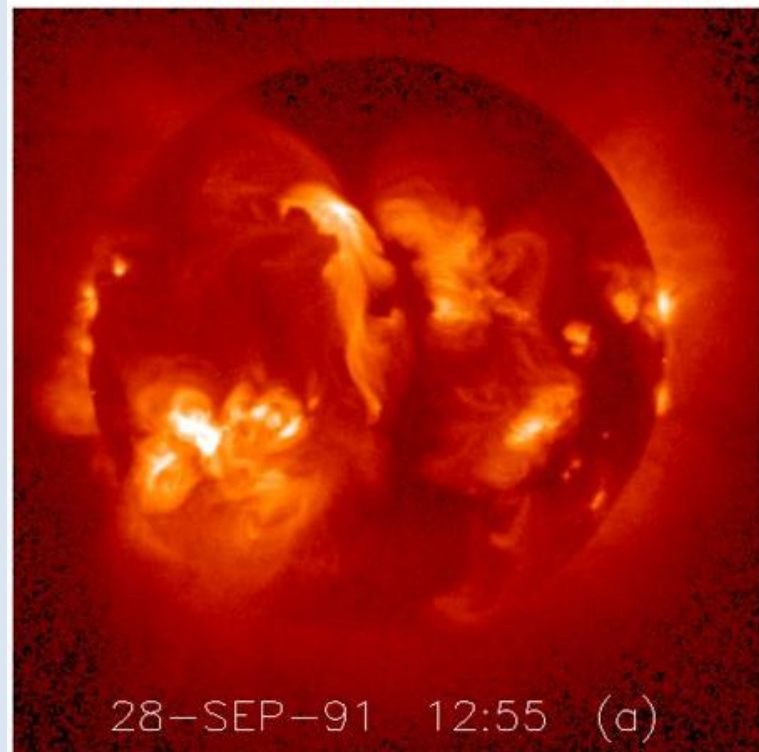
Czas: 1991-2001



Solar maximum

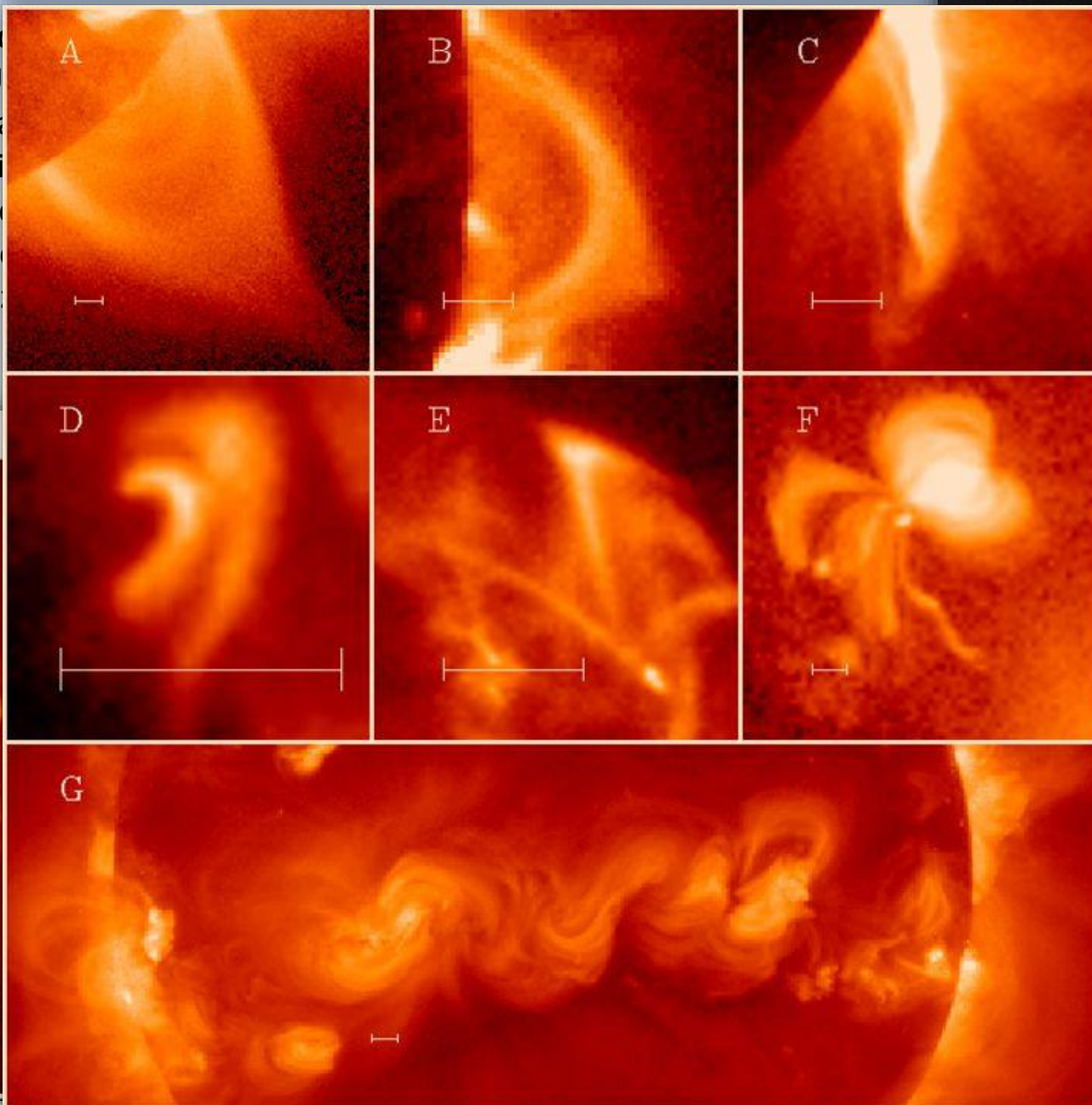
Yohkoh SXT data

Solar minimum



Przykładowe obrazy SXT

Y
U
Z
F
P
R
C



Yohkoh/ SXT

- A) helmet-shaped arch
- B) arcade loops
- C) eruptive loop
- D) quadrupolar loops
- E) cusped loops
- F) double arcade
- G) sigmoidal loops

Przykładowe obrazy SXT

Hinode, teleskop XRT (X-ray Telescope)

Układ optyczny: GI, Wolter I

Zakres: 0.5-6 nm

Filtry szerokopasmowe

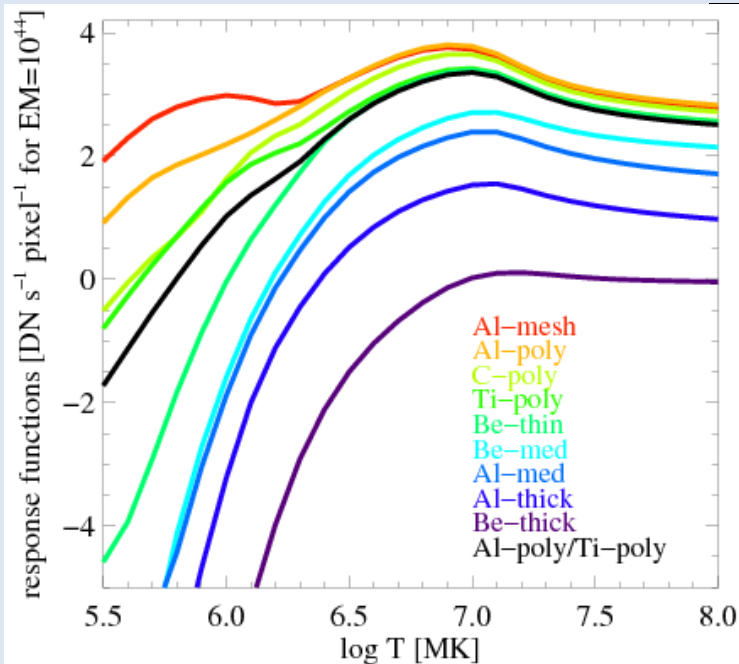
Pole widzenia 34x34 arcmin

Rozdzielczość: 1 arcsec/px

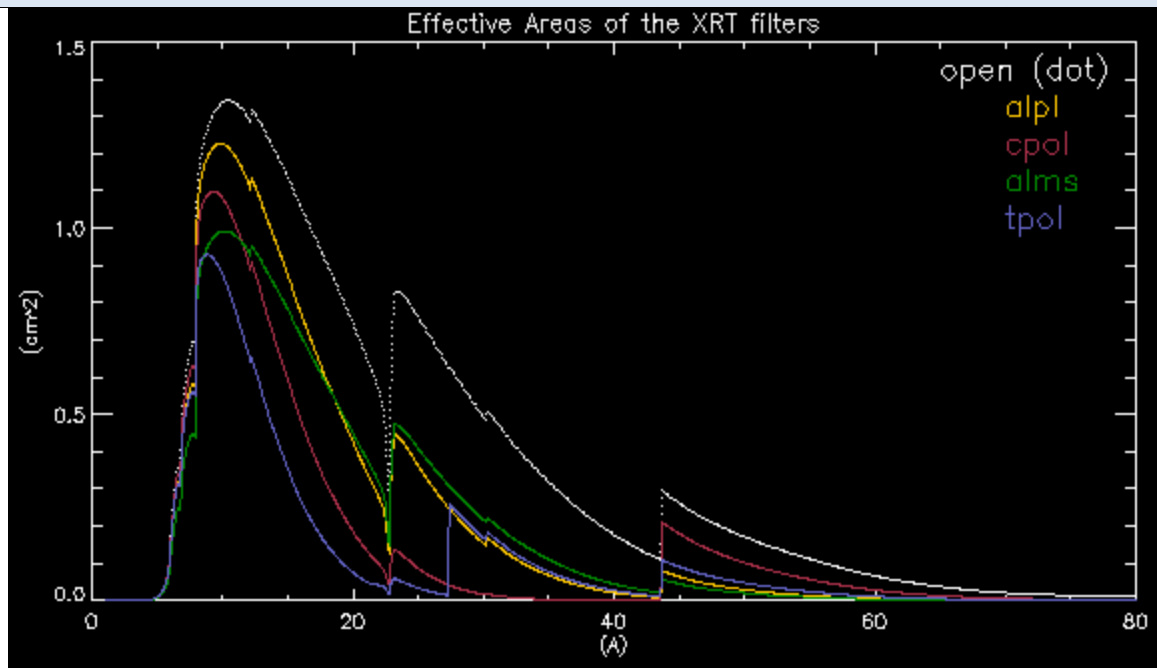
Czas: 2006-...



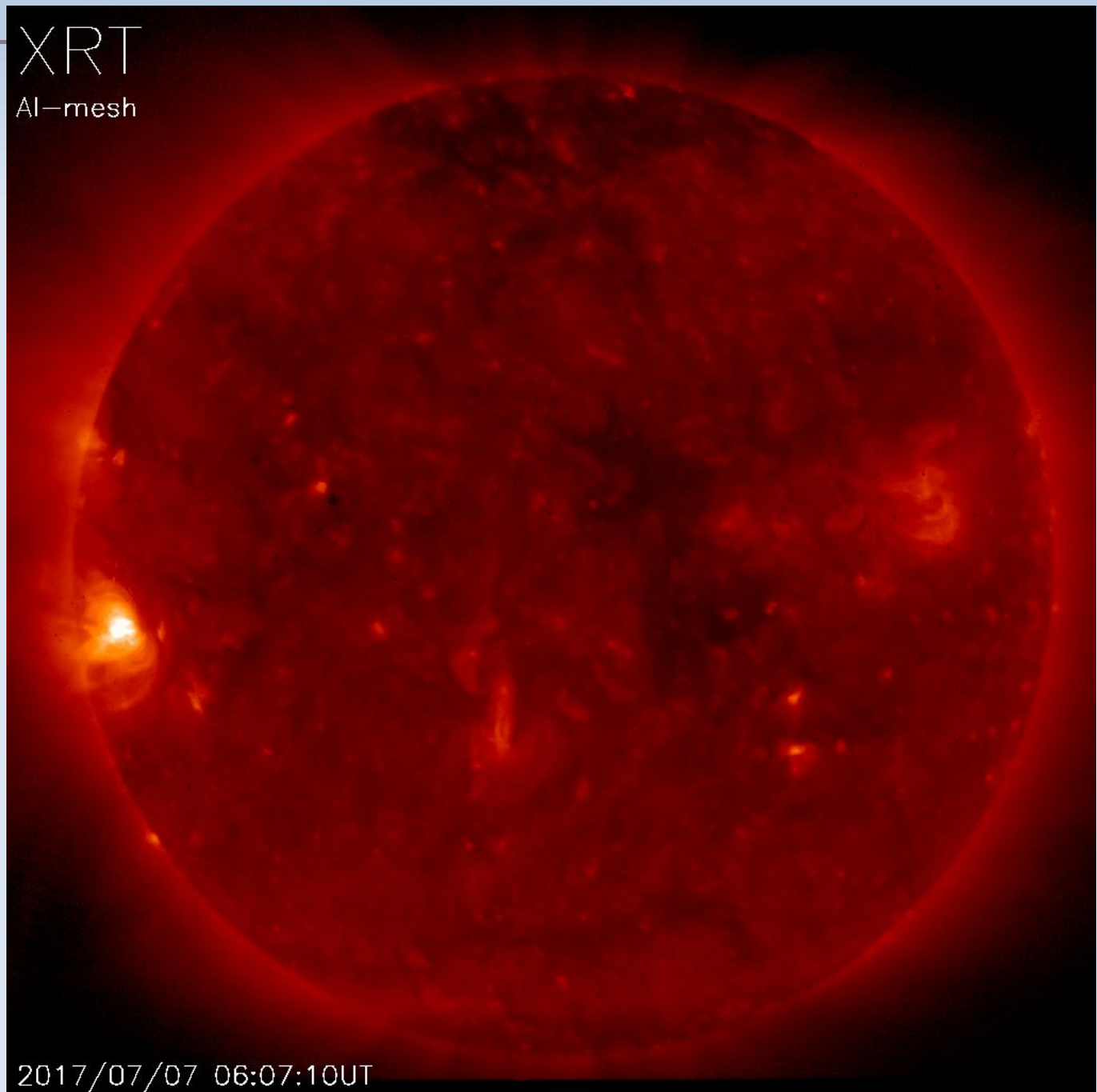
Odpowiedź termiczna XRT dla różnych filtrów.
Widać, że teleskop jest czuły na szeroki zakres temperatur, co oznacza małą rozdzielczość termiczną.



Powierzchnia efektywna XRT dla różnych filtrów.



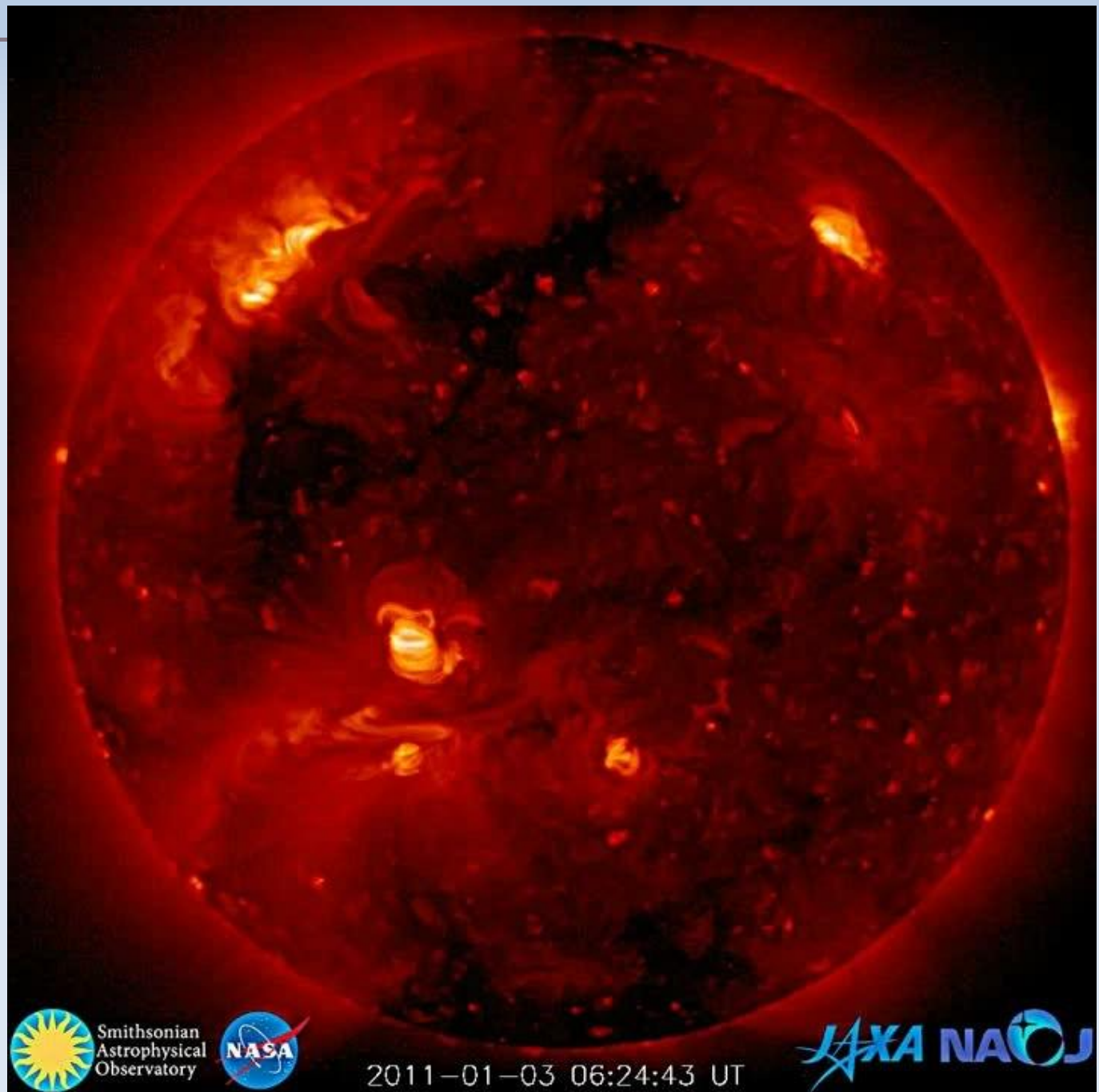
XRT
Al-mesh



*Przykładowy obraz XRT dla
okresu niskiej aktywności
słonecznej*

2017/07/07 06:07:10UT

*Przykładowy obraz XRT dla
okresu wysokiej aktywności
słonecznej*



2011-01-03 06:24:43 UT



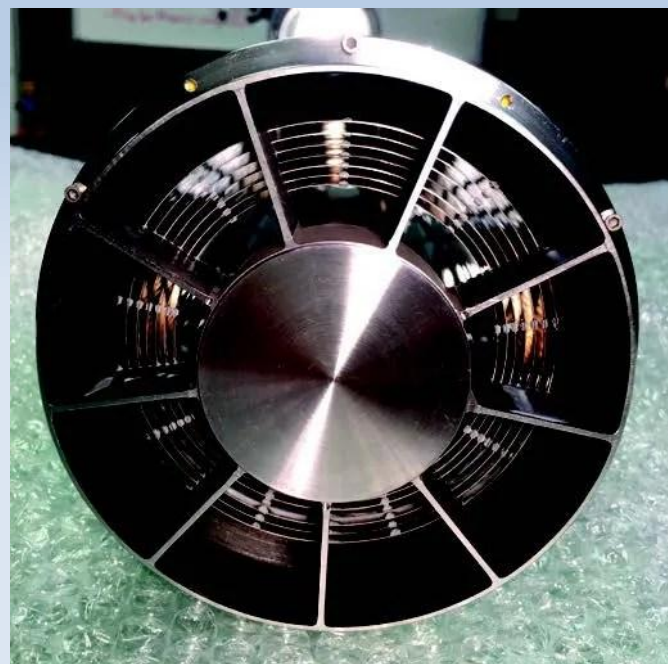
Focusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI)

Układ optyczny: GI, Wolter I

Zakres: 3-55 keV (zmienne zależnie od misji)

Rozdzielczość: 8 arcsec, 0.8 keV, 0.1 s

Czas: powtarzana misja raketowa, dotychczas 4x, 5 w przygotowaniu



lustro FOXIS 3

porównanie
obrazów
rozłysku B2.7
uzyskanych z
obserwacji
RHESSI
(obrazowanie
fourierowskie) i
FOXIS
(obrazowanie
bezpośrednie)
[Krucker at al.
2014]

