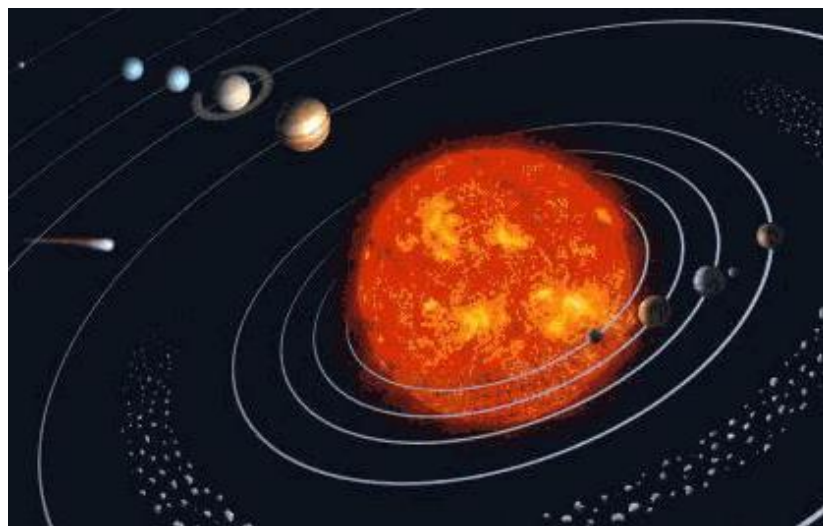


Fizyka i chemia atmosfery

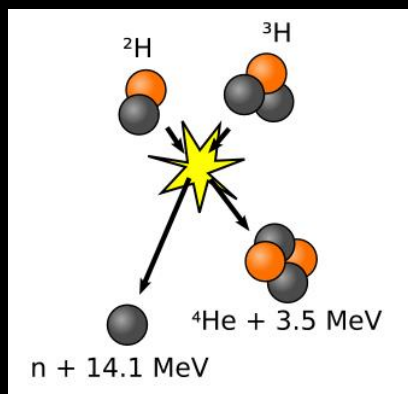
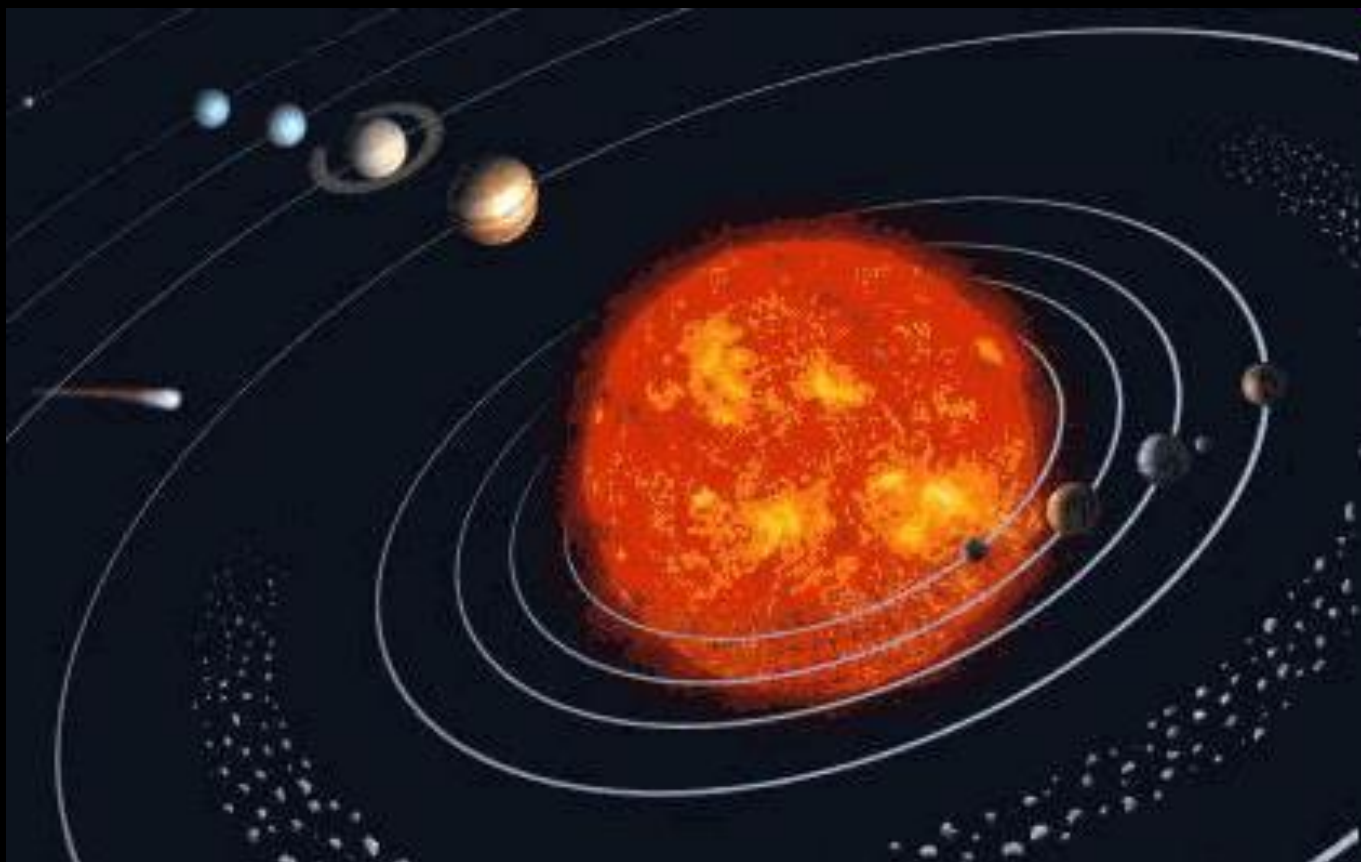
Wykład II

Słońce, nasz kosmiczny piec



Grzegorz Karwasz,
Instytut Fizyki UMK, a.a. 2024/2025

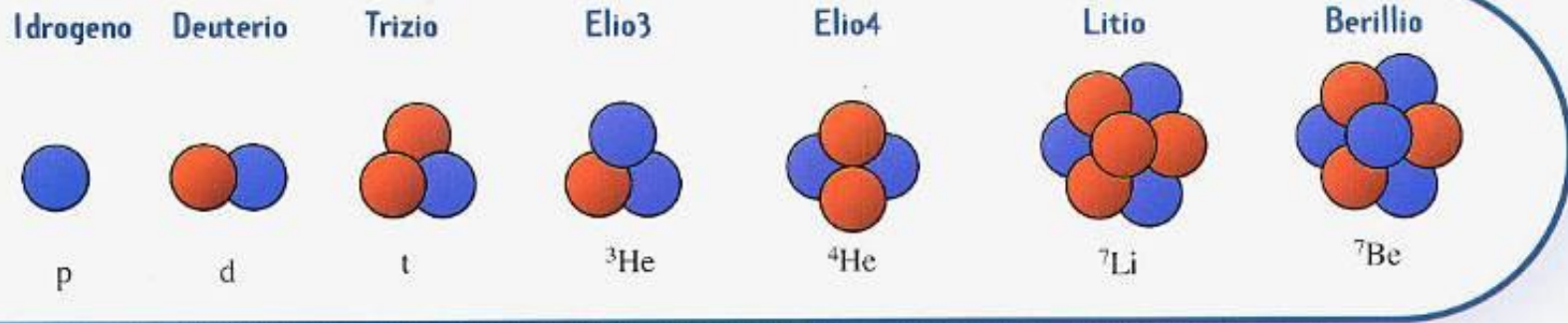
Słońce, nasz kosmiczny piec



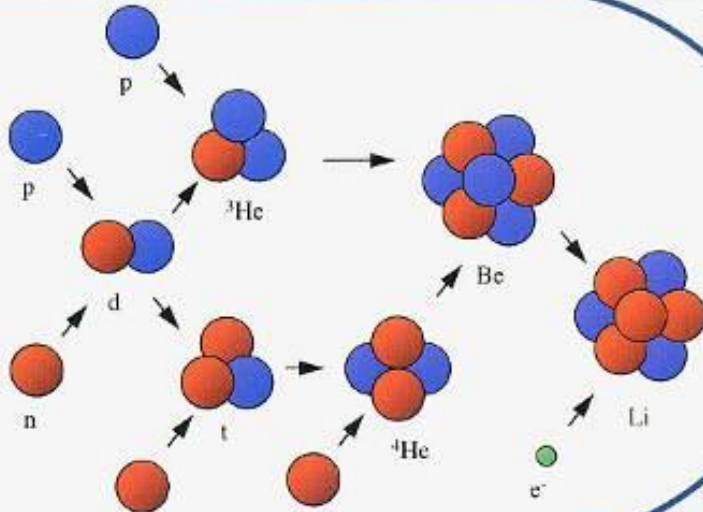
$^1_0\text{n} + ^1_1\text{p} \rightarrow ^2_1\text{H}$; $^1_0\text{n} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^3_1\text{H}$
 $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} (+3,5 \text{ MeV}) + ^1_0\text{n} (+14,1 \text{ MeV})$
 $^4_2\text{He} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^8_4\text{Be} - 93,7 \text{ keV.}$
 $^8_4\text{Be} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{12}_6\text{C} + \gamma + 7,37 \text{ MeV}$
itd. aż do żelaza i niklu

Reazioni termonucleari

600 milioni di tonnellate di idrogeno „bruciate” in elio in un secondo



La formazione di questi nuclei avviene in seguito alle reazioni schematizzate nel grafico:



Un protone e un neutrone collidono e si uniscono a formare un nucleo di deuterio. Un nucleo di deuterio può unirsi a un protone per formare elio 3, oppure può unirsi a un neutrone per formare un nucleo di trizio. In questo modo, combinando le specie che vengono via via formate, si ottengono i nuclei atomici degli elementi più leggeri, nel processo noto come “nucleosintesi cosmologica”.

Passati i primi tre minuti, l'Universo è troppo freddo perché possano continuare a formarsi nuovi nuclei. Circa il 30% dell'elio presente oggi nell'Universo è stato creato in questi primi tre minuti.

Passati 300.000 anni dal Big Bang, l'energia si è sufficientemente ridotta da consentire ai nuclei atomici di catturare gli elettroni formando così gli atomi neutri. L'Universo è ora trasparente alla radiazione. Avviene cioè il disaccoppiamento radiazione - materia.

Spektroskopia

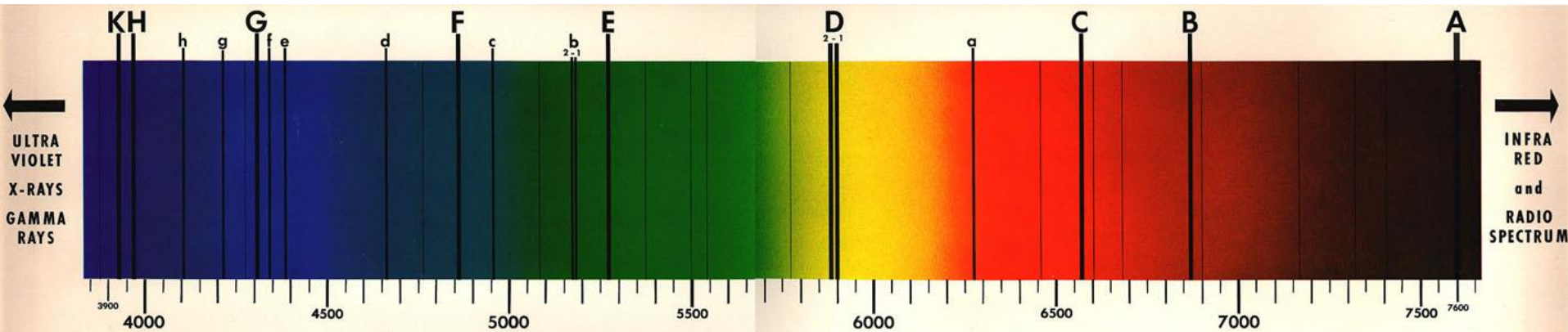
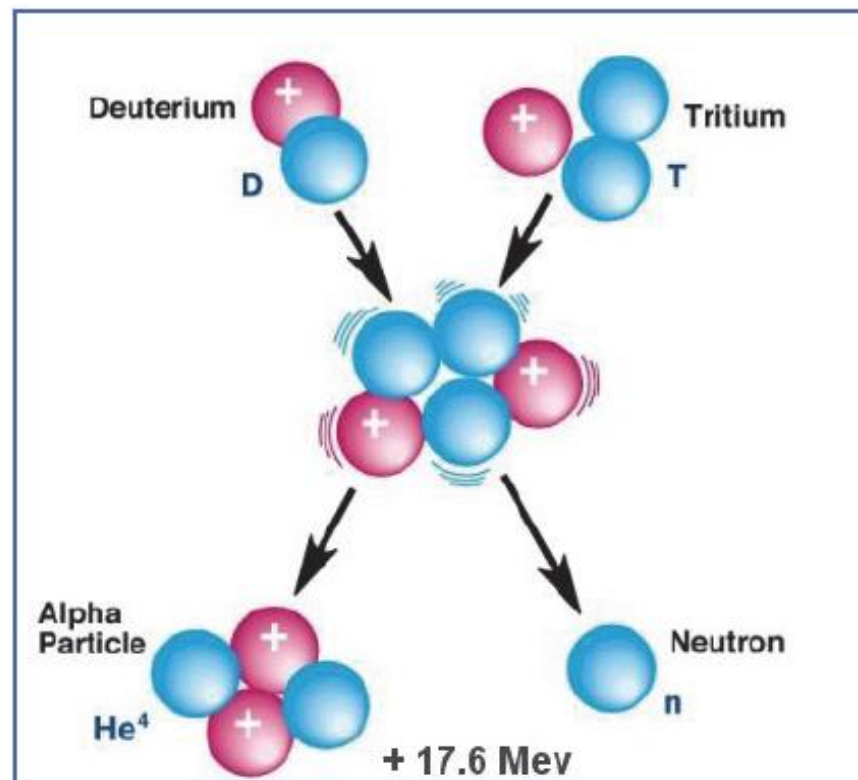
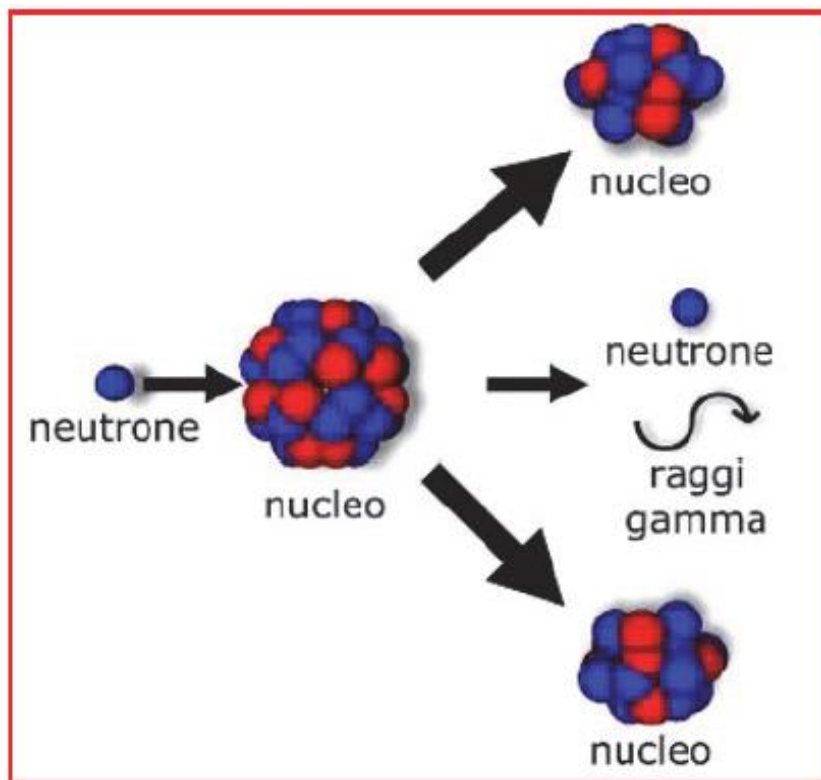


Table 1 -- "Known" Lines

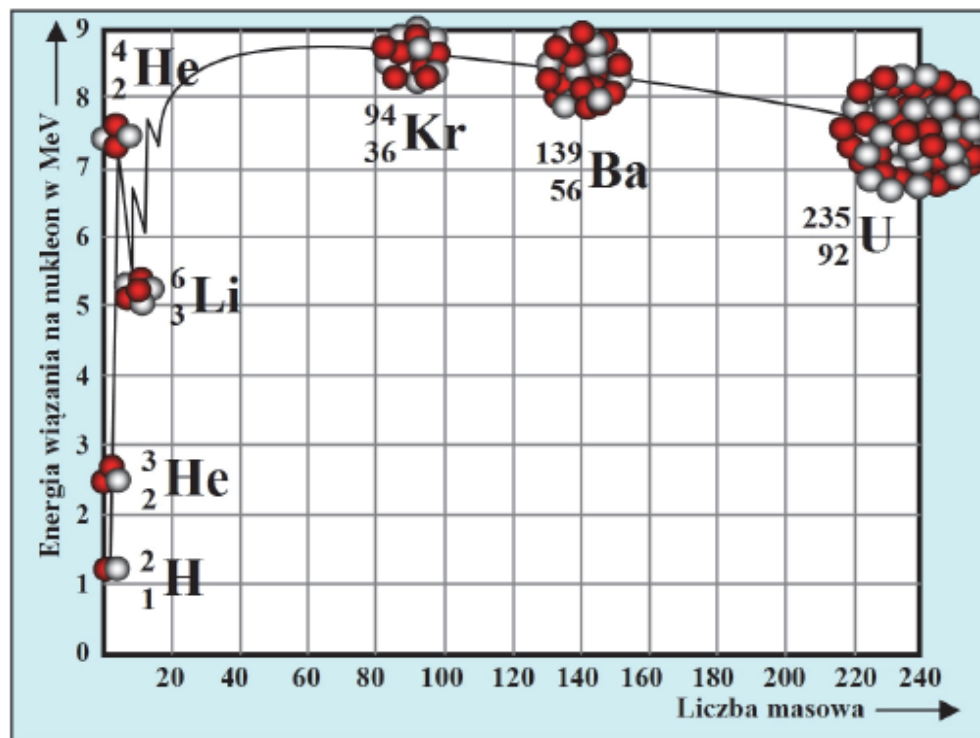
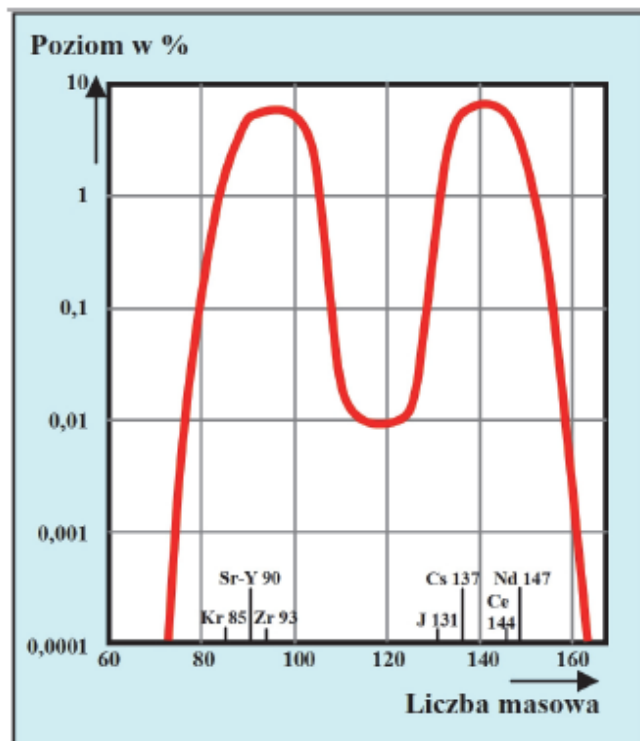
Designation	Wavelength (Angstrom)	Origin
A	7594	terrestrial oxygen
B	6867	terrestrial oxygen
C	6563	hydrogen (H α)
D ₁	5896	neutral sodium (Na I)
D ₂	5890	neutral sodium (Na I)
E	5270	neutral iron (Fe I)
F	4861	hydrogen (H β)
H	3968	ionized calcium (Ca II)
K	3934	ionized calcium (Ca II)

Reakcje jądrowe



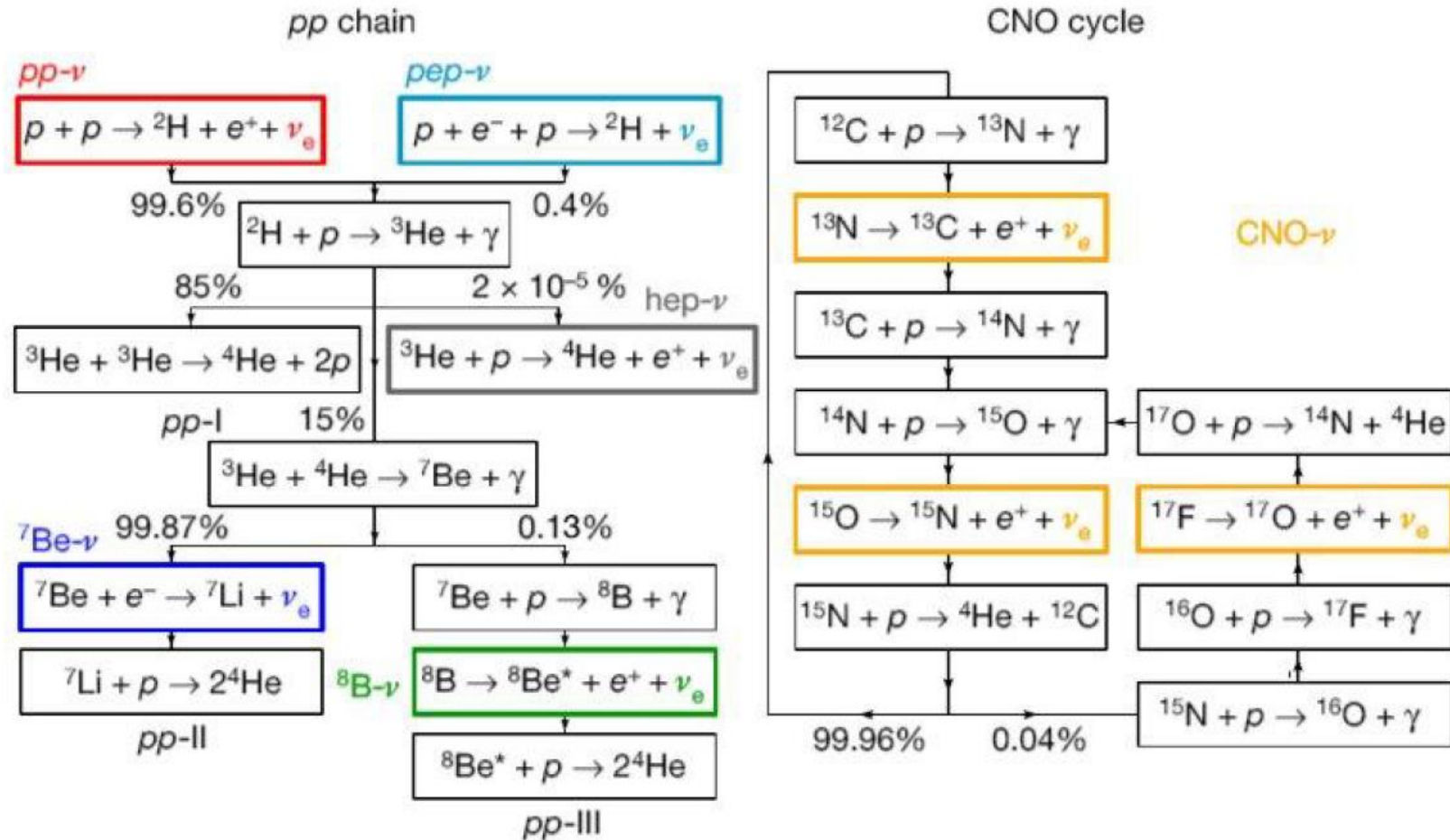
Ryc. 3.9. Dwie reakcje jądrowe dostarczające ogromnych ilości energii: **a)** rozszczepienie jądra, np. uranu ^{235}U po pochłonięciu neutronu; **b)** synteza (fuzja) dwóch jąder wodoru – deuteru ^2H i trytu ^3H w jądro helu ^4He ; z fuzji pozostaje jeden neutron – część z 17,6 MeV energii jest unoszona przez ^4He część przez neutron (Źródło: DeAgostini, i Every Day Science Blog)

Skąd w Ziemi tyle żelaza?



Ryc. 3.10. a) Produkty rozszczepienia uranu ^{235}U (na dwa fragmenty) obejmują szeroki rozkład izotopów od $A = 70$ do $A = 170$; zwróć uwagę, że skala pionowa jest względna (0.1, 1, 10); **b)** energia wiązania na jeden nukleon w zależności od liczby masowej A ; cząstka alfa, czyli ^4He ma dużą energię wiązania; maksimum krzywa osiąga około żelaza ^{56}Fe ; dla jąder poniżej masy żelaza korzystna energetycznie jest synteza, powyżej żelaza – rozszczepienie (Źródło: European Nuclear Society)

Nukleosynteza

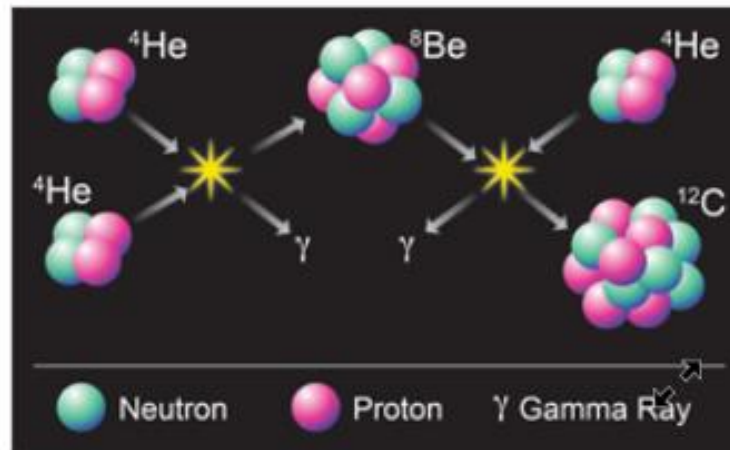


Rys. 9.4. Wykres dwóch łańcuchów syntezy termojądrowej na Słońcu. Oba łańcuchy są połączone reakcją bardzo mało prawdopodobną - wychwytu cząstki *alfa* ${}^4\text{He}$ przez stan wzbudzony berylu ${}^8\text{Be}^*$ (zielona ramka). Wyniki pomiarów Gran Sasso (współpraca Borexino) z lat 2012-2016. ŹRÓDŁO: "Nature", 25.10. 2018

Hoyle: cosmologiczny cud

May 9, 2011 • *Physics* 4, 38

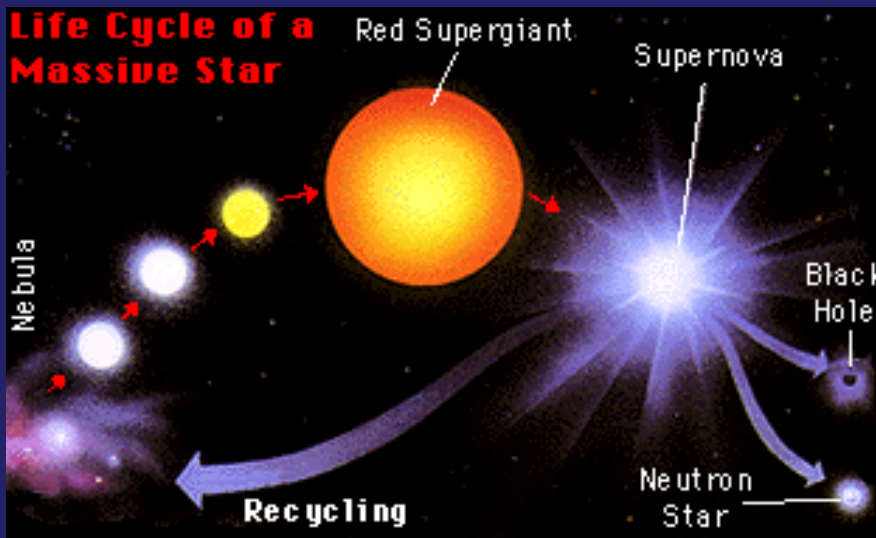
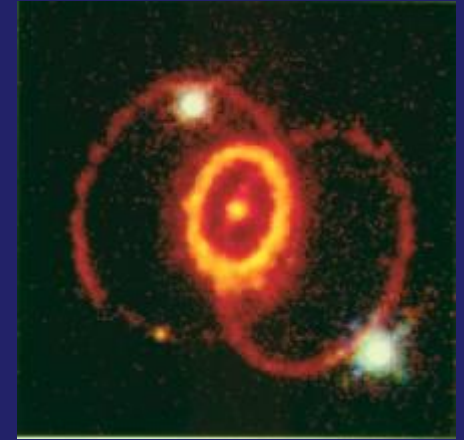
The series of reactions that leads to the production of carbon in stars was predicted more than sixty years ago, but theorists have struggled to reproduce this process from first principles calculations.



Credit: Carin Cain

Figure 1: Synthesis of carbon in a burning star. Two alpha particles react to form beryllium-8. Beryllium-8 and an alpha particle react to form carbon-12, proceeding via the Hoyle state. This state in carbon-12 is a “resonance” in the beryllium-8 plus alpha-particle system. Once the resonant state is formed, it tends to decay by breaking up into beryllium-8 and an alpha particle. However, approximately four out of ten thousand decays bring the excited carbon-12 nucleus to its stable ground state.

Słońce = gwiazda z „odzysku”



Wszechświat: 13,5 mld lat

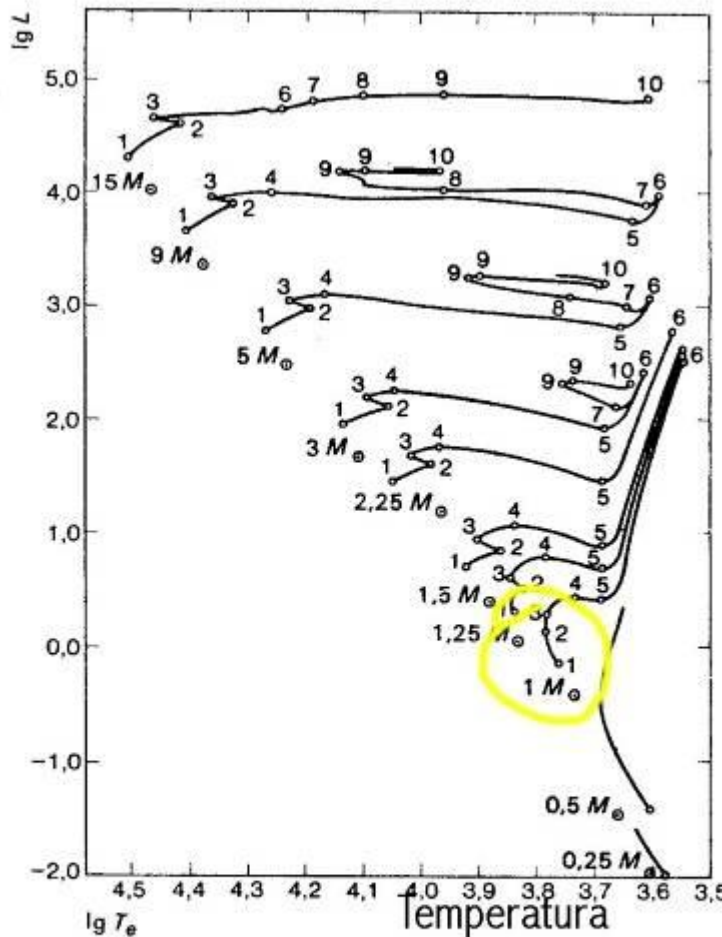
System słoneczny: 4,5 mld



Słońce – mała, peryferyjna gwiazda

Słońce – gwiazda mała

Prędkość ewolucji gwiazd w 10^7 lat



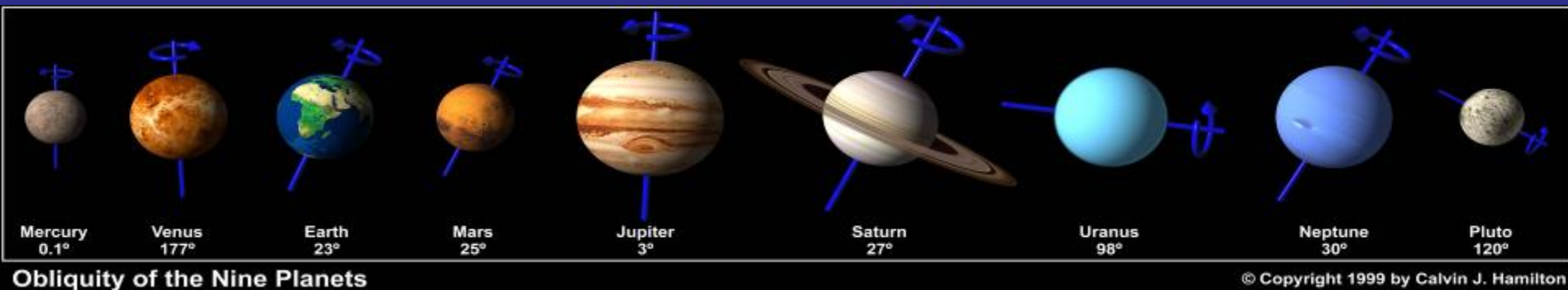
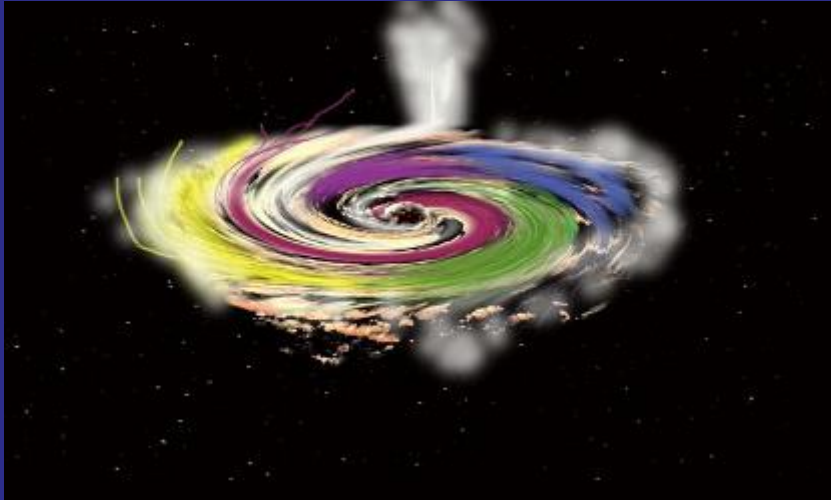
Rys. 1. Zmiany ewolucyjne gwiazd o różnych masach przedstawione na tzw. wykresie Hertzsprunga-Russella. L jest jasnością absolutną gwiazdy w jednostkach Słońca, T_e temperaturą powierzchni gwiazdy. Numery 1–10 oznaczają kolejne stadia ewolucji. Słońce znajduje się obecnie w punkcie 2 na torze ewolucyjnym gwiazdy o 1 masie Słońca

Tempo ewolucji gwiazd o różnych masach (masy gwiazd podane są w jednostkach masy Słońca, czas — w jednostkach 10^7 lat)

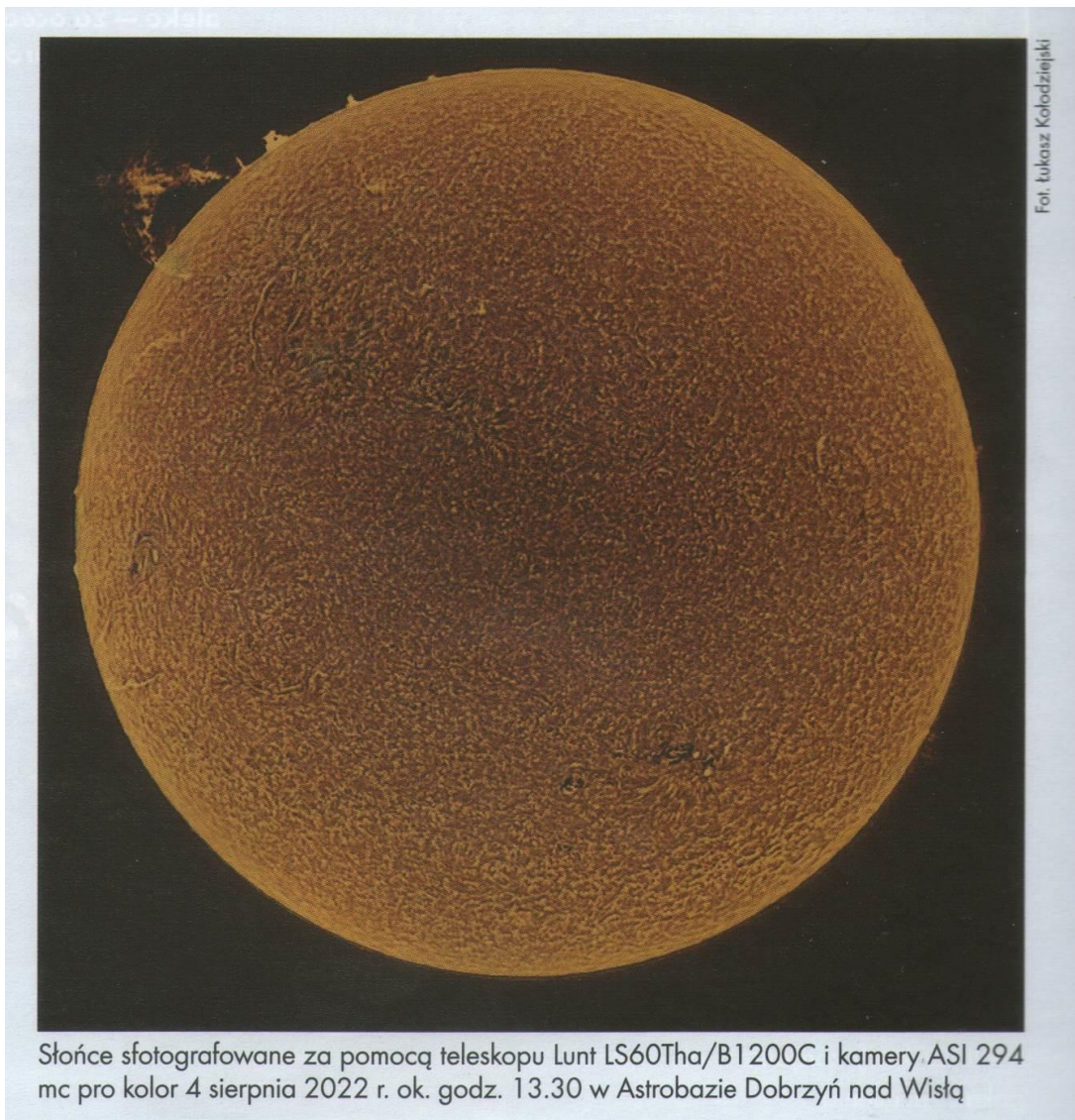
Punkty	Masa			
	9	5	2,25	1,25
1–2	2,144	6,547	46,02	280,3
2–3	0,060	0,217	1,647	18,24
3–4	0,009	0,137	3,696	104,5
4–5	0,013	0,075	1,310	14,63
5–6	0,006	0,049	3,829	40,0
6–7	0,049	0,605		
7–8	0,010	0,102		
8–9	0,328	0,900		
9–10	0,016	0,093		

Słońce – gwiazda leniwa

Powstanie systemu Słonecznego



Komórki „konwekcyjne”



Oscylacje powierzchni Słońca
- okres około 5 minut.

Energia wyprodukowana we wnętrzu Słońca jest transportowana na jego powierzchnię przez promieniowanie.

W zewnętrznych warstwach, ze względu na dużą nieprzezroczystość materii [a raczej z uwagi na mniejszą energię kwantów promieniowania], ten mechanizm nie jest efektywny i ustępuje konwekcji.

Zewnętrzne 30% promienia Słońca to obszar turbulentnej konwekcji. Obserwujemy dziesiątki tysięcy nieradialnych modów oscylacji.

Radosław Smolec, *Trzęsienia Słońca i gwiazd*, Urania 6/2022, 24.

Źródło: Urania

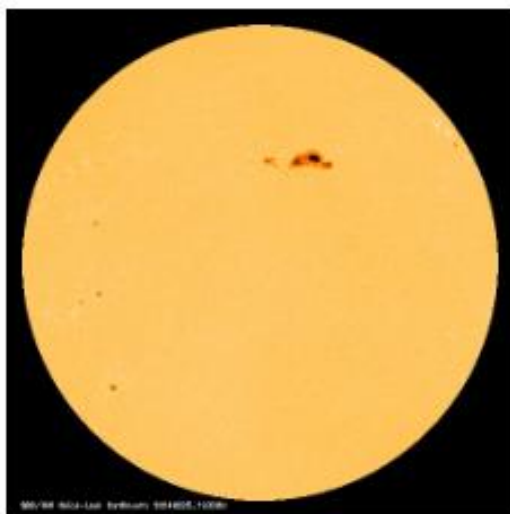
Słońce dziś

Słońce dziś

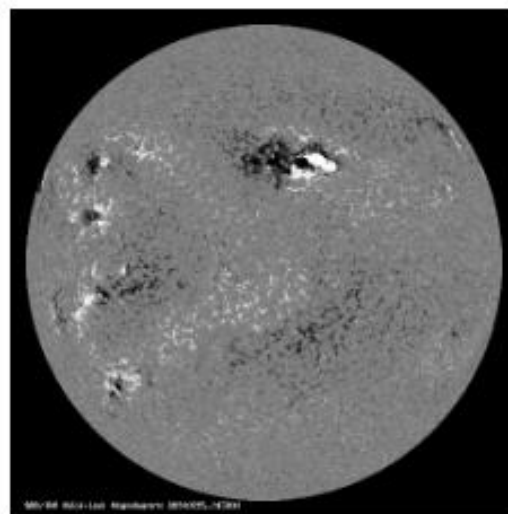
https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/209

Zdjęcia

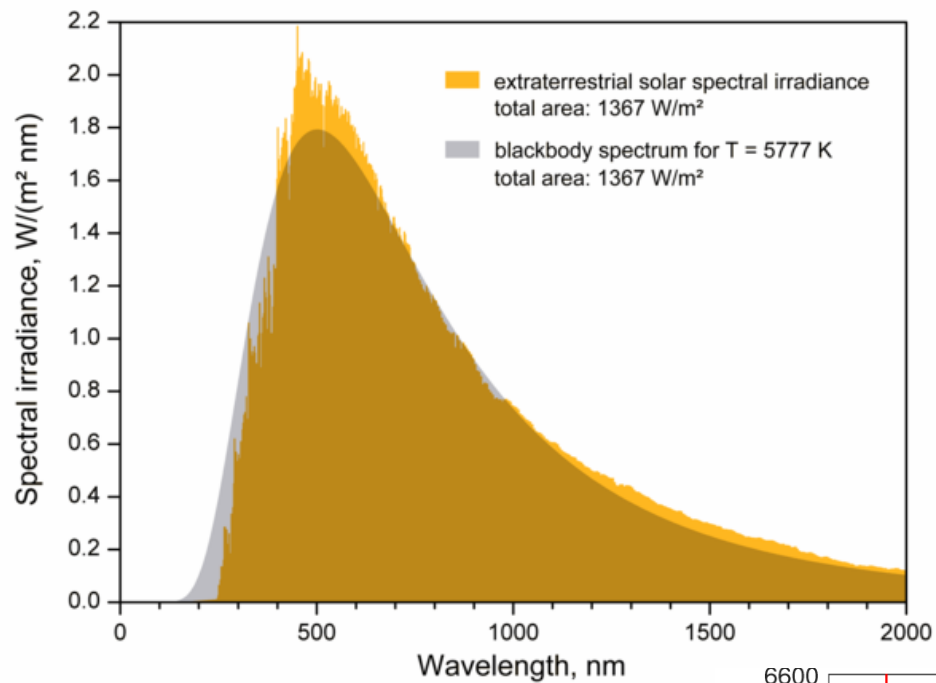
Zdjęcia MDI (**Michelson Doppler Imager**) pokazują aktualny obraz Słońca w przybliżeniu w paśmie widma widzialnego. Magnetogram (po prawej) pokazuje obraz fotosfery z białymi i czarnymi elementami wskazującymi przeciwną polaryzację.



Obraz 1024x1024



Obraz 1024x1024



Temperatura fotosfery

$$T = 5772 \text{ K}$$

$$P = 1372 \text{ W/m}^2$$

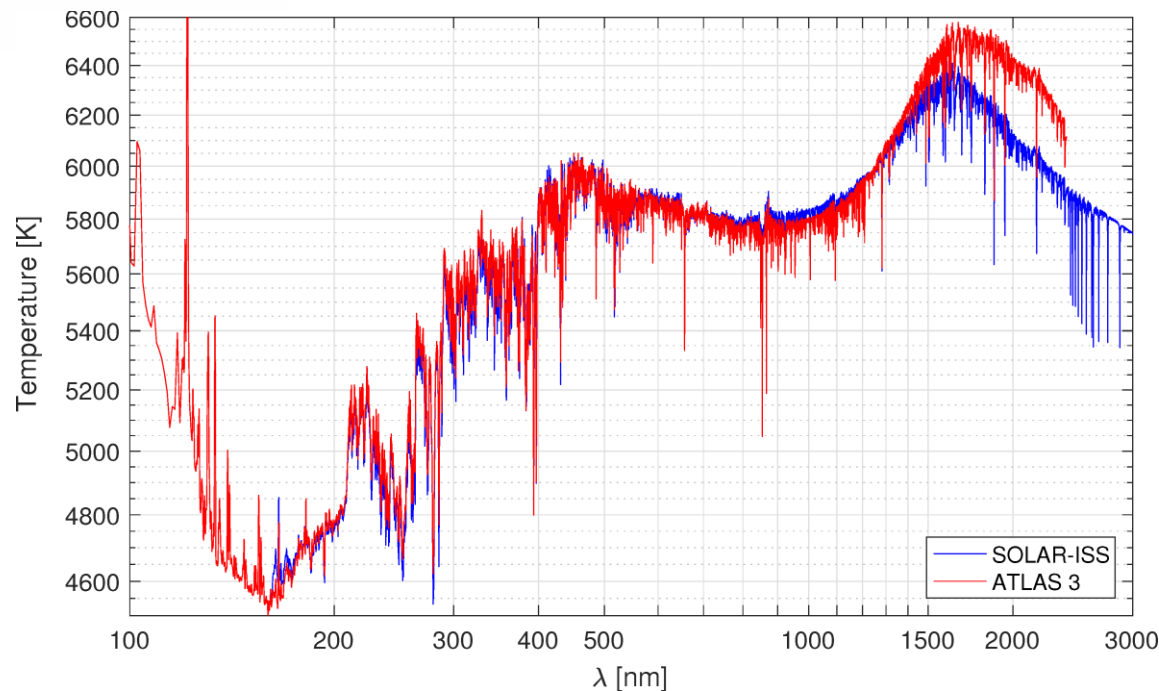
ISS@ 400 km (2018, minimo)

160-3000 nm

UV 8%

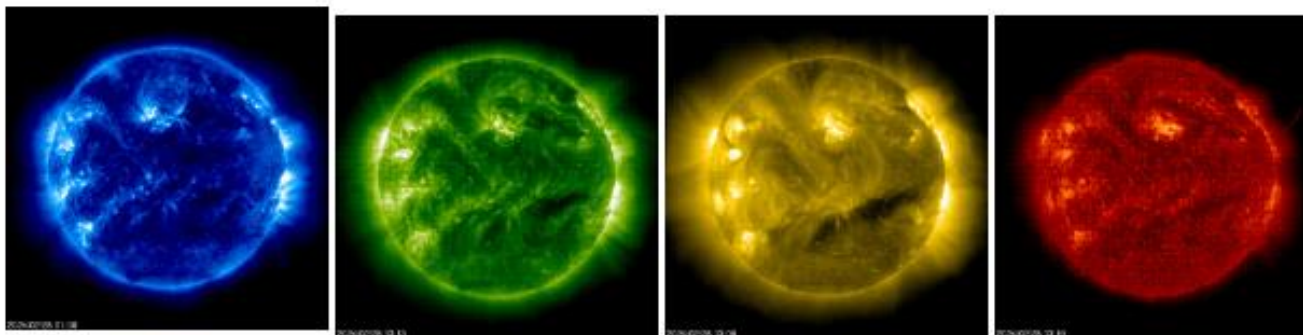
VIS 400-700 nm 39%

IR 51%



Słońce dziś

Poniższe zdjęcia przedstawiają aktualny obraz Słońca z teleskopu EIT (**Extreme Ultraviolet Imaging Telescope**) w czterech długościach fali (171 Å, 195 Å, 284 Å, 304 Å) wyrażonej w Å (**Angstrom**). Odpowiadają one temperaturom od 60.000 K do 2.000.000 K.



EIT 171
(1.000.000 K)

Obraz 1024x1024

EIT 195
(1.500.000 K)

Obraz 1024x1024

EIT 284
(2.000.000 K)

Obraz 1024x1024

EIT 304
(60.000 - 80.000 K)

Obraz 1024x1024

To nie są temperatury! Są to określone linie widmowe:

Fe IX/X emission line at 171 Å, Fe XII at 195 Å, Fe XV at 284 Å
while that on the right was obtained in He II 304 Å

"Korona" słoneczna

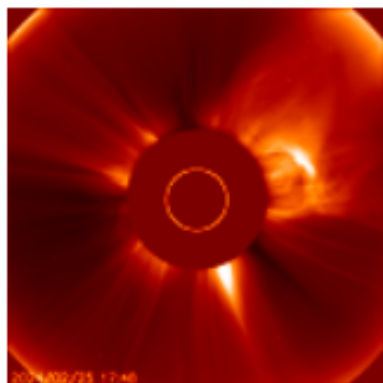
Korona słoneczna

LASCO (**L**arge **A**ngle **S**pectrometric **C**oronagraph) jest w stanie robić zdjęcia korony słonecznej, blokując światło pochodzące bezpośrednio od Słońca przesłoną - dyskiem, tworząc sztuczne zaćmienie. Położenie tarczy słonecznej jest pokazane na zdjęciach/filmach jako biały okrąg na środku.

Zdjęcia C2 pokazują wewnętrzną koronę słoneczną do 8,4 mln km od Słońca.

Zdjęcia C3 mają większe pole widzenia: Obejmują one 32 średnice Słońca. Pokazują koronę słoneczną do 45 mln km od Słońca (połowa średnicy orbity Merkurego).

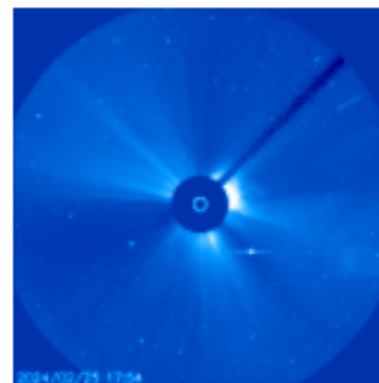
Obrazki poniżej prowadzą do filmów, które pokazują koronę słoneczną w ciągu ostatnich 48 godzin.



LASCO C2

[Film \(większy\)](#)

[Ostatni obraz 512x512](#)

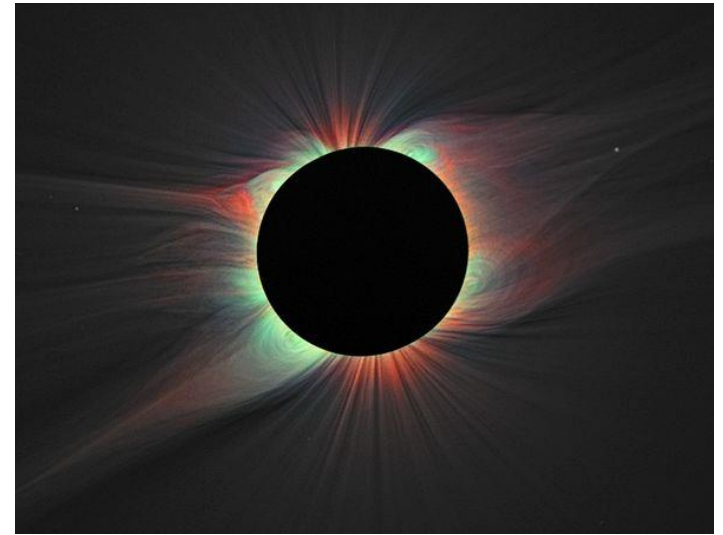
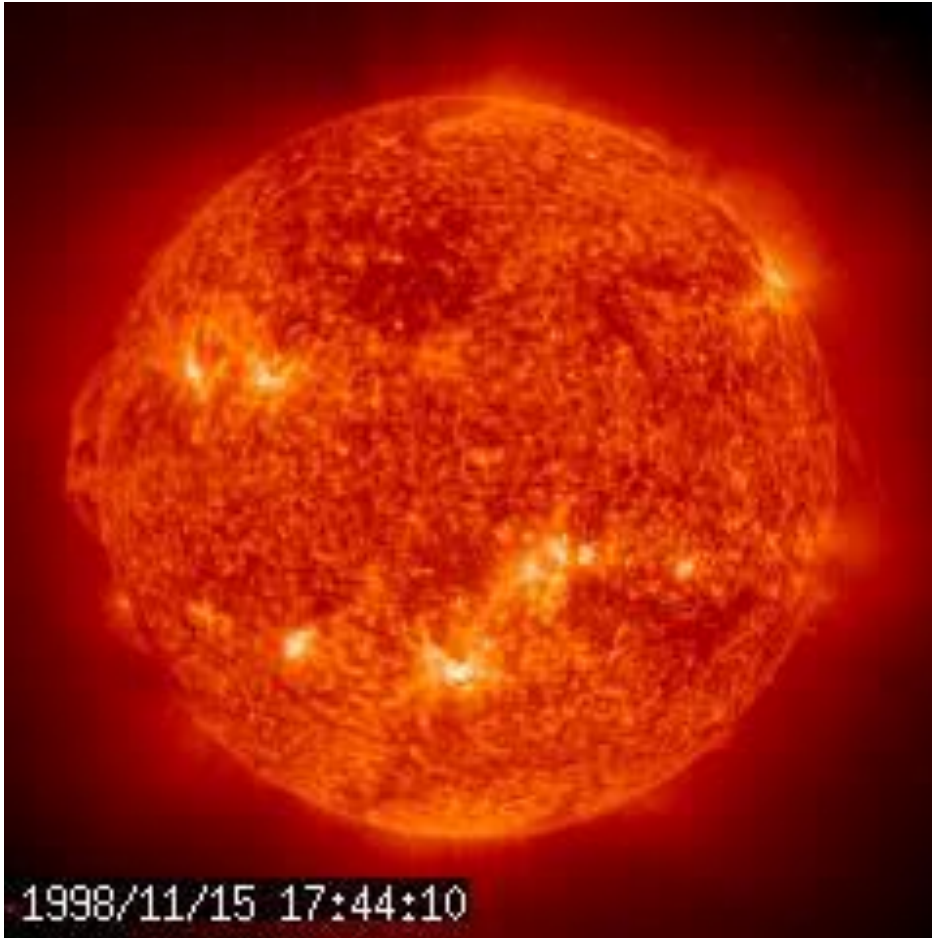


LASCO C3

[Film \(większy\)](#)

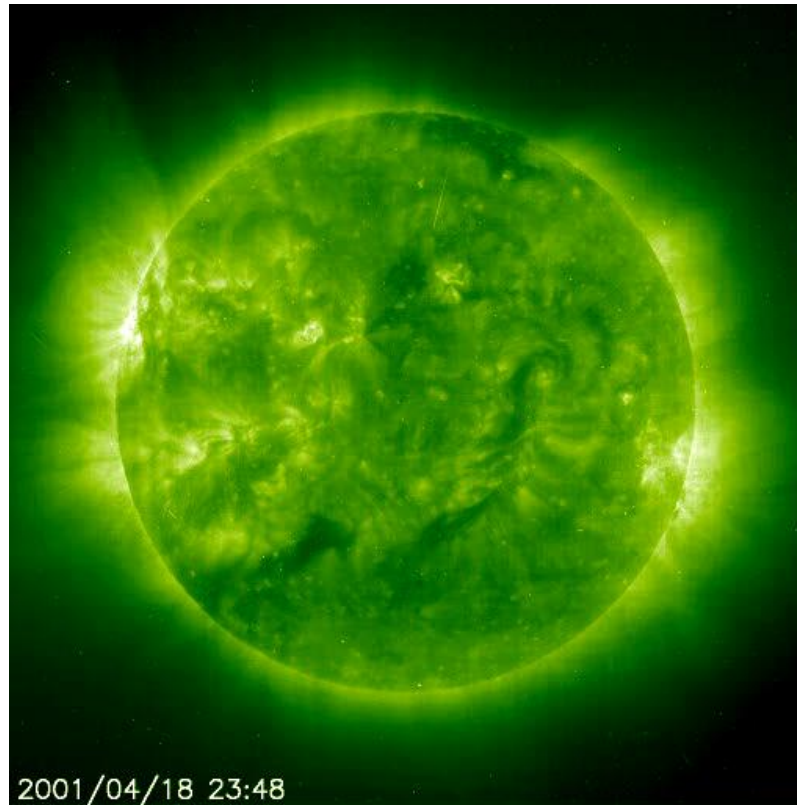
[Ostatni obraz 512x512](#)

SOHO – studi del Sole nelle diverse regioni spettrali



NG13_iron-sun_11783_600x450

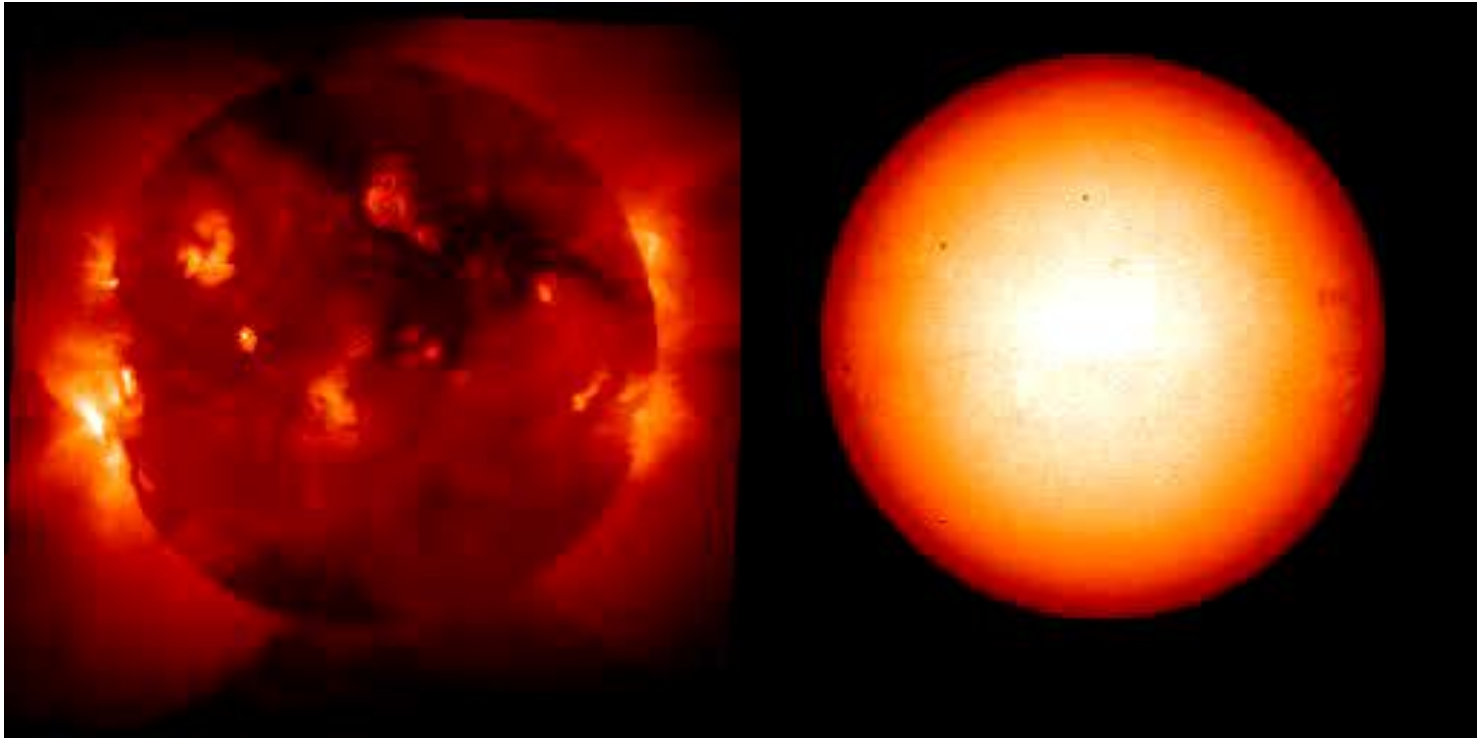
„Protuberancje”, czyli eksplozje magnetyczne



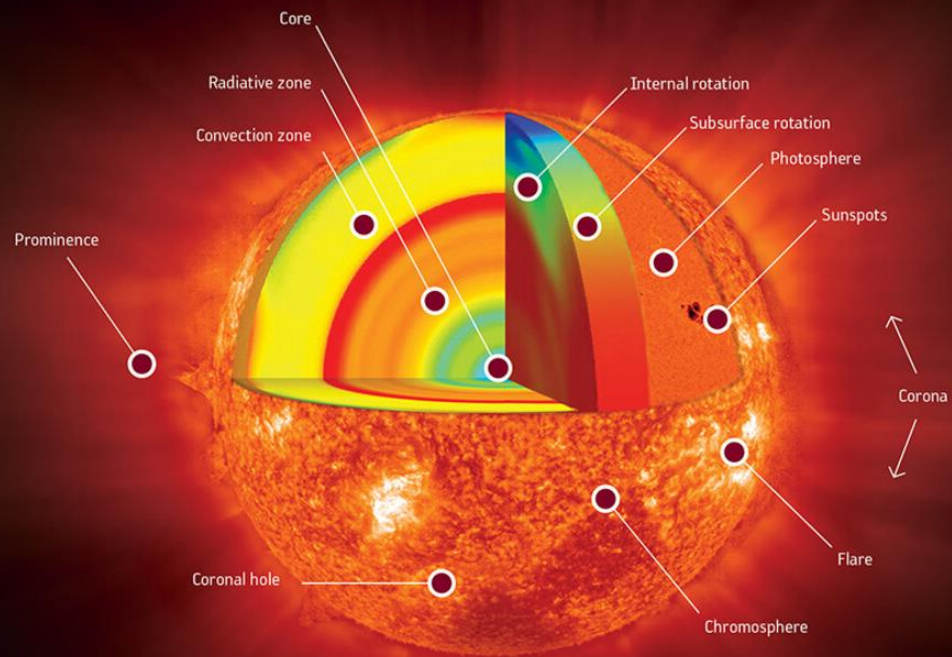
Widmo rentgenowskie

"Plamy" to obszary bardzo gorącej plazmy,
ciemne w widmie widzialnym dla ludzi

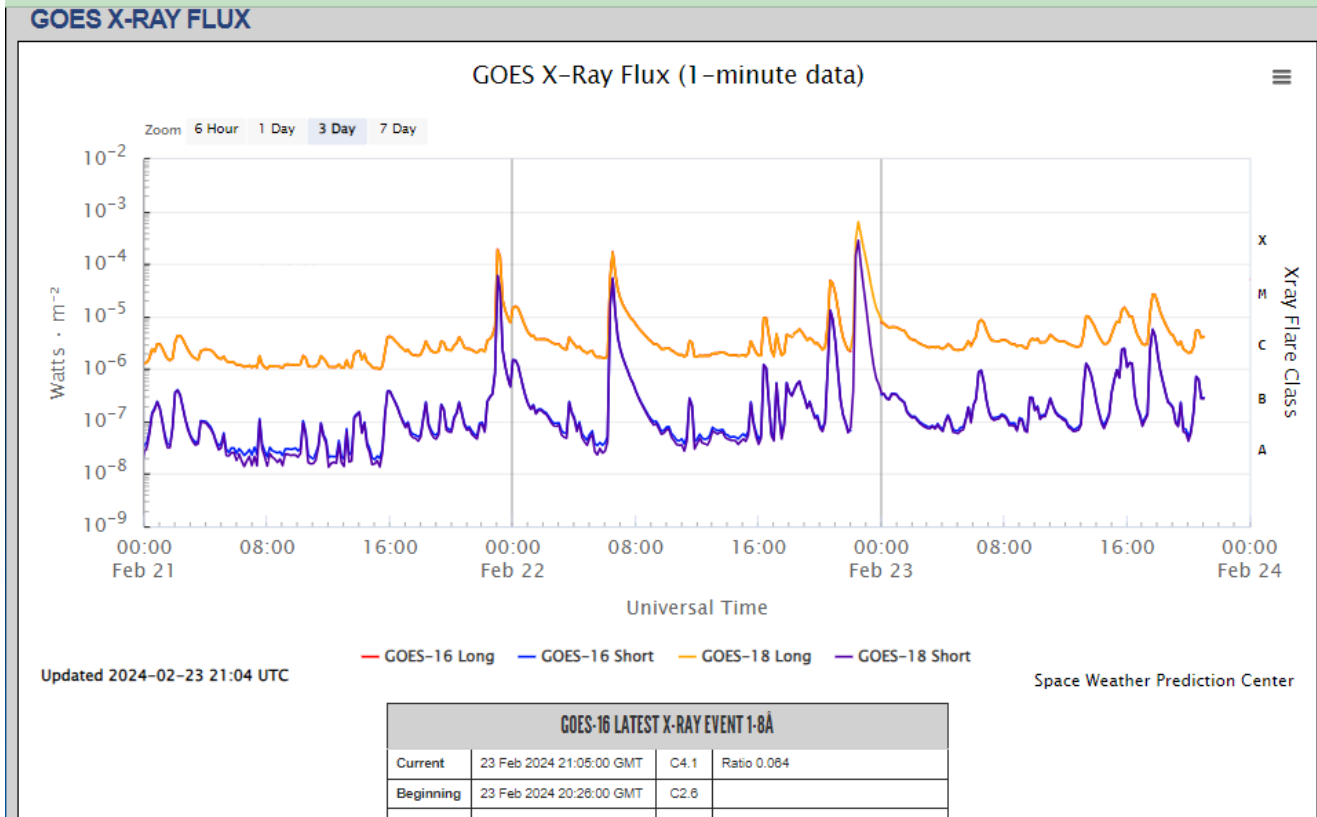
Słoneczne "plamy" [Galileo] – czyli ultragorące studnie pola magnetycznego



Wnętrze Słońca



Solar flares (X-Ray monitoring)

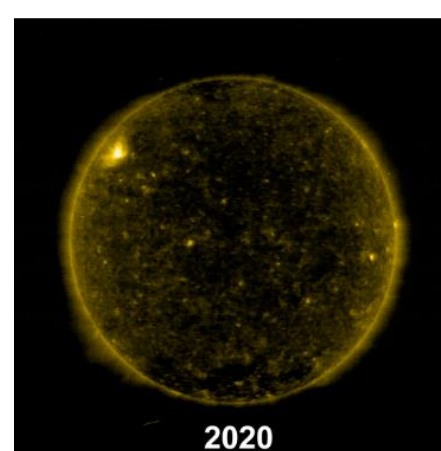
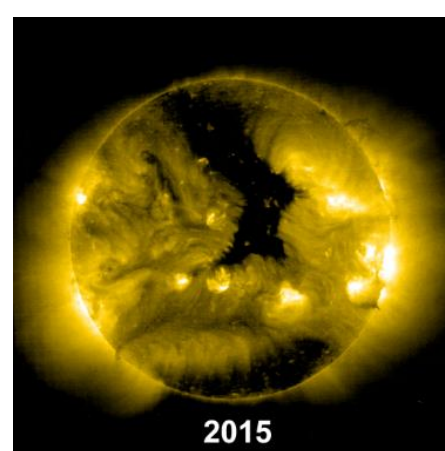
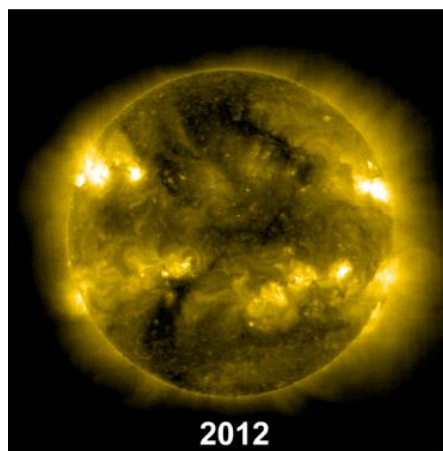
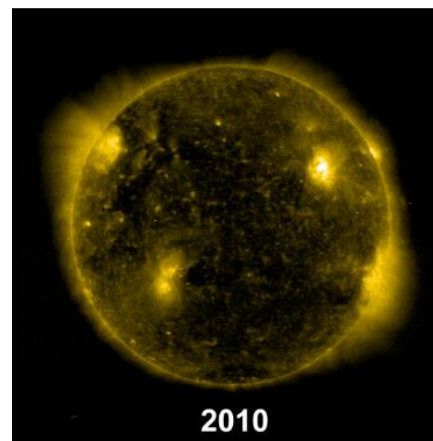
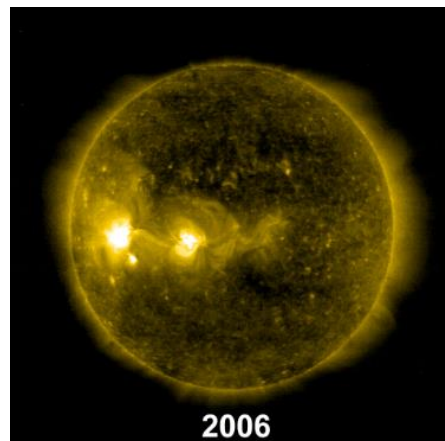
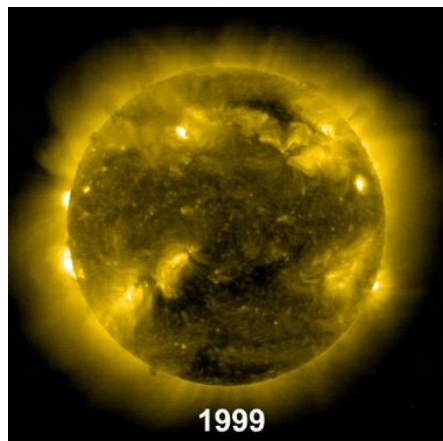


An X3.2-class solar flare observed in different wave-lengths. Clockwise from top left: 304, 335, 131, and 193 Å

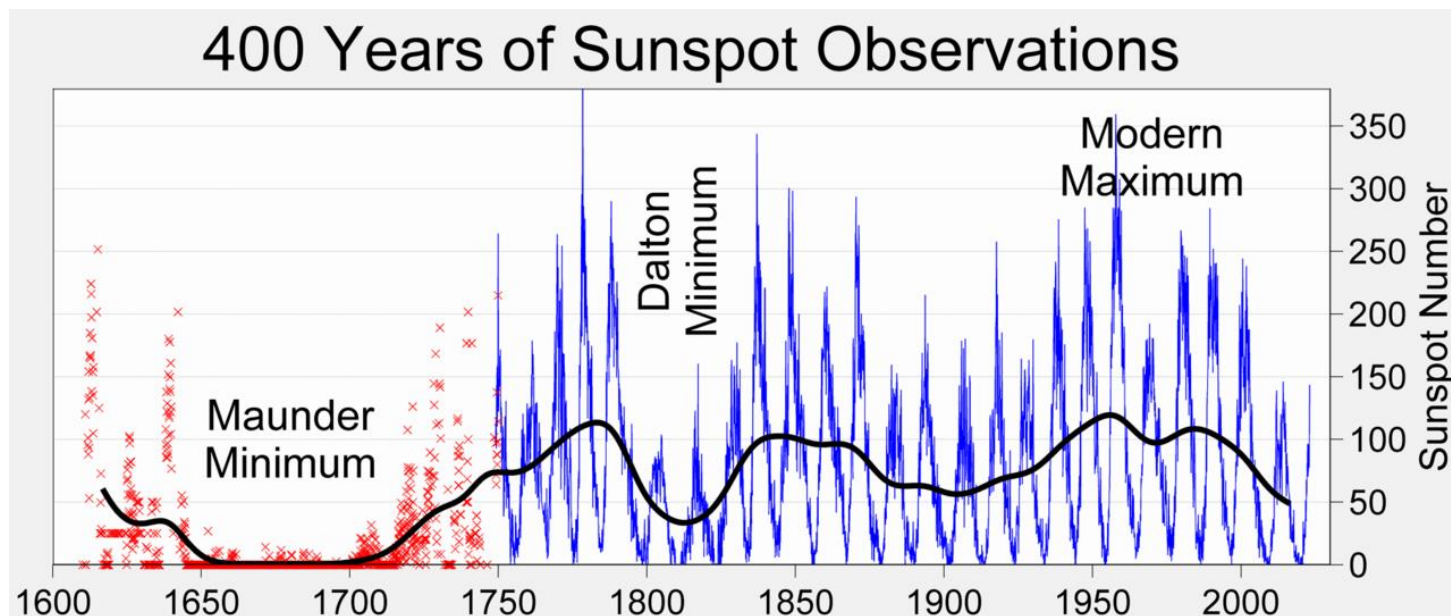
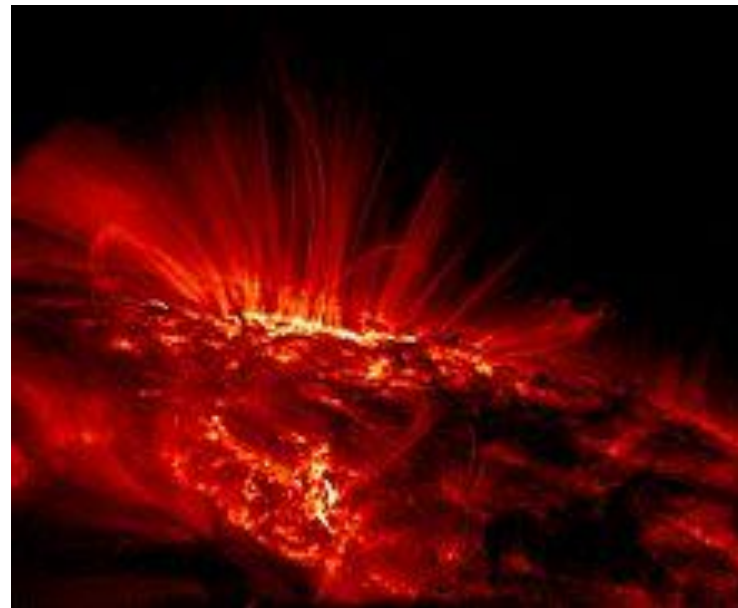
The GOES X-ray plots shown here are used to track solar activity and solar flares. Large solar X-ray flares can change the Earth's ionosphere, which blocks high-frequency (HF) radio transmissions on the sunlit side of the Earth. Solar flares are also associated with Coronal Mass Ejections (CMEs) which can ultimately lead to geomagnetic storms. SWPC sends out space weather alerts at the M5 (5×10^{-5} Watts/mw) level. Some large flares are accompanied by strong radio bursts that may interfere with other radio frequencies and cause problems for satellite communication and radio navigation (GPS).

<https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>

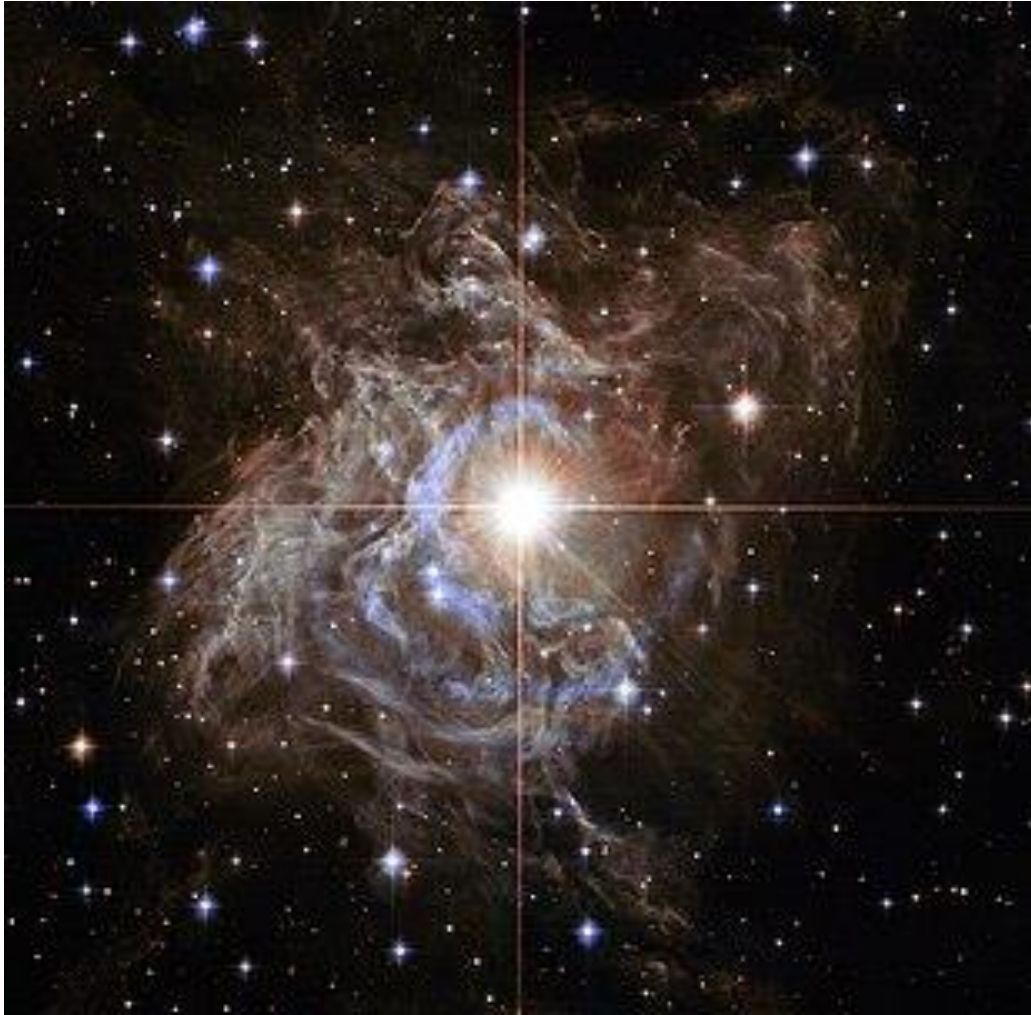
Zmiany długo-okresowe



„Plamy” słoneczne a klimat na Ziemi



Pulsacije cefeid

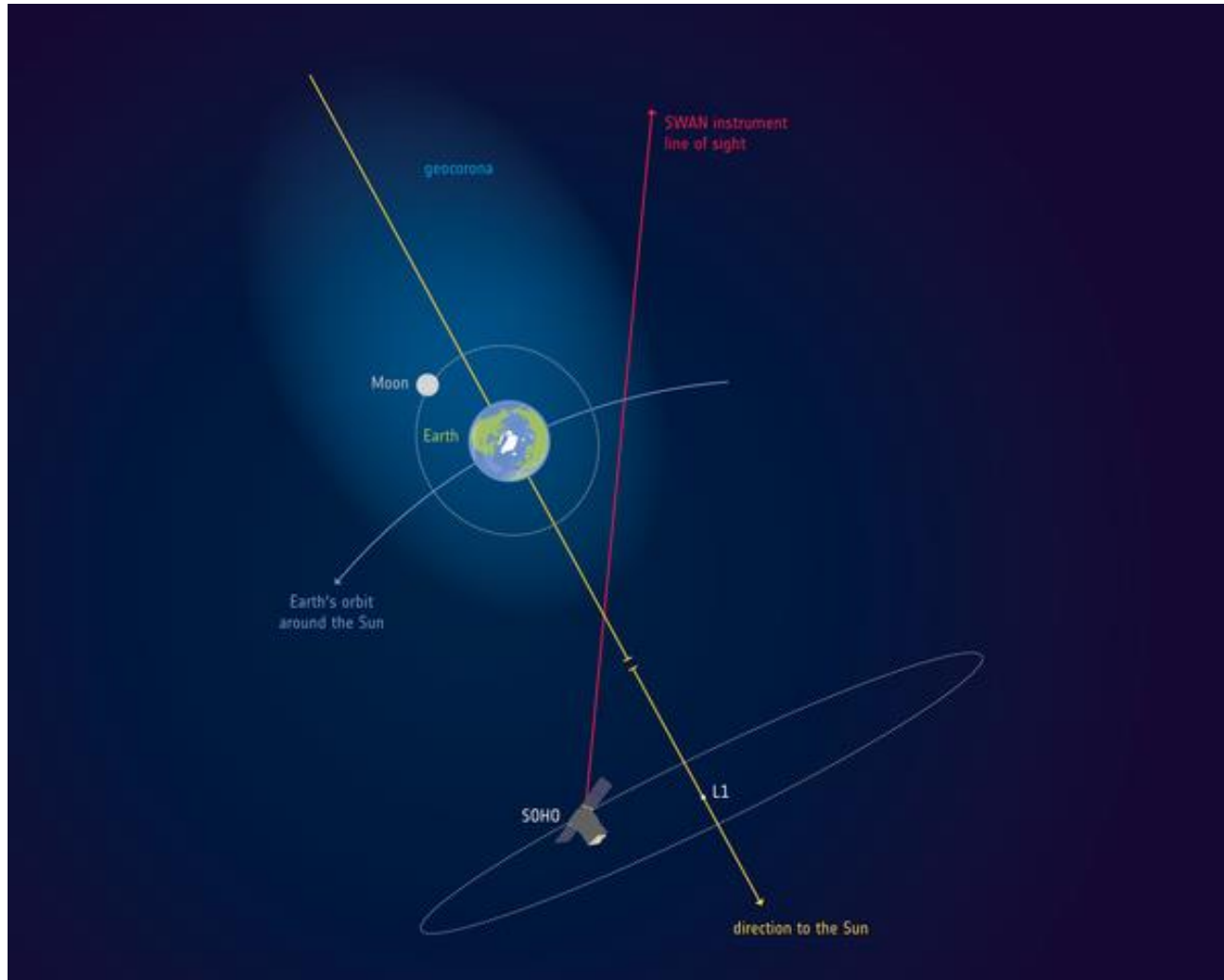


The main gas involved is thought to be [helium](#). The cycle is driven by the fact [doubly ionized](#) helium, the form adopted at high temperatures, is more opaque than singly ionized helium. As a result, the outer layer of the star cycles between being compressed, which heats the helium until it becomes doubly ionized and (due to opacity) absorbs enough heat to expand; and expanded, which cools the helium until it becomes singly ionized and (due to transparency) cools and collapses again. Cepheid variables become dimmest during the part of the cycle when the helium is doubly ionized.

[RS Puppis](#), one of the brightest known Cepheid variable stars in the [Milky Way](#) galaxy
([Hubble Space Telescope](#))

https://en.wikipedia.org/wiki/Cepheid_variable

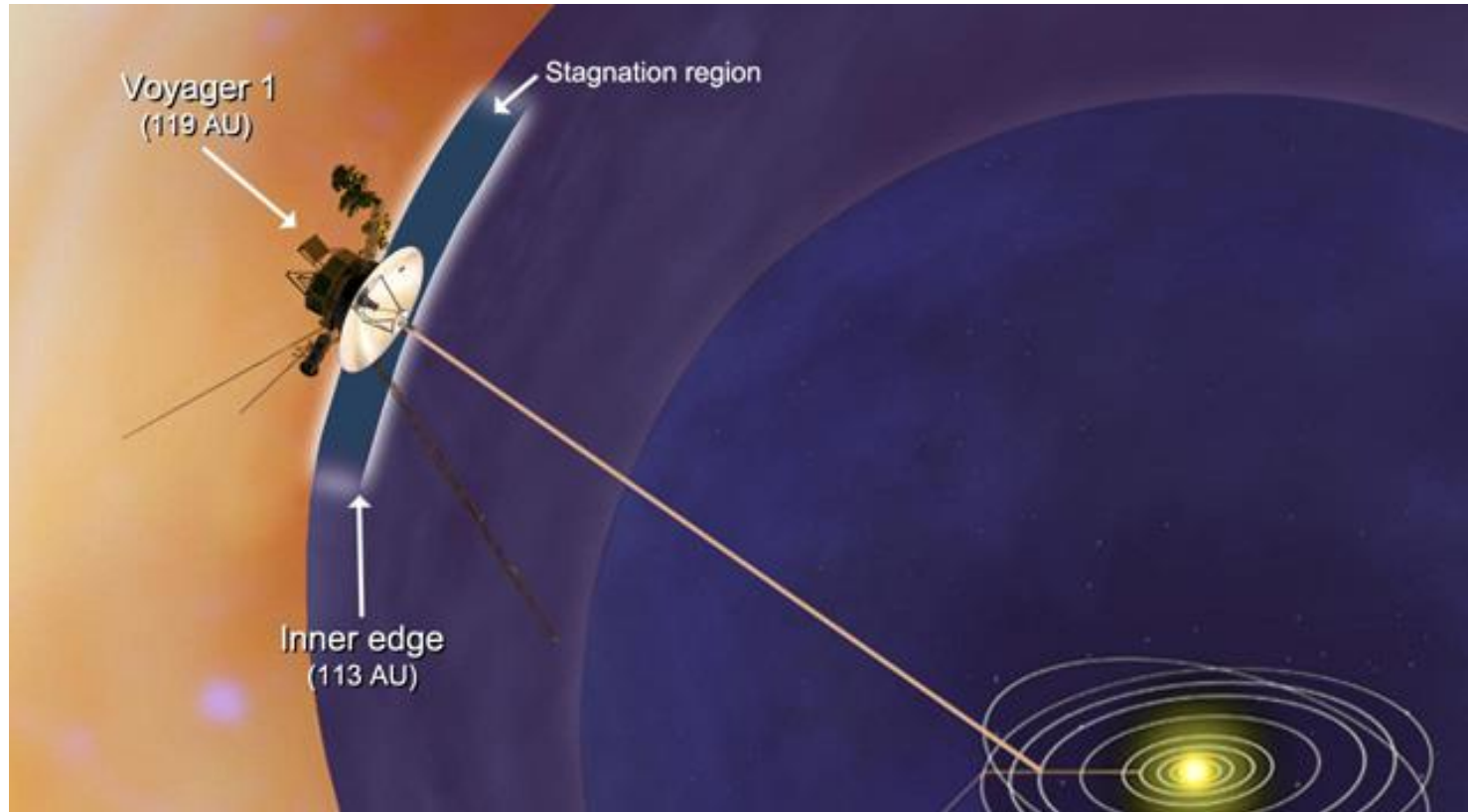
Atmosfera ziemiska rozciąga się poza Księżyc



up to 630 000 km away, or 50 times the diameter of our planet.
The denser dayside region of **hydrogen** is still rather sparse, with just 70 atoms per cubic centimeter at 60 000 kilometers above

<https://sci.esa.int/web/soho/-/61130-earth-atmosphere-stretches-out-to-the-moon-and-beyond>

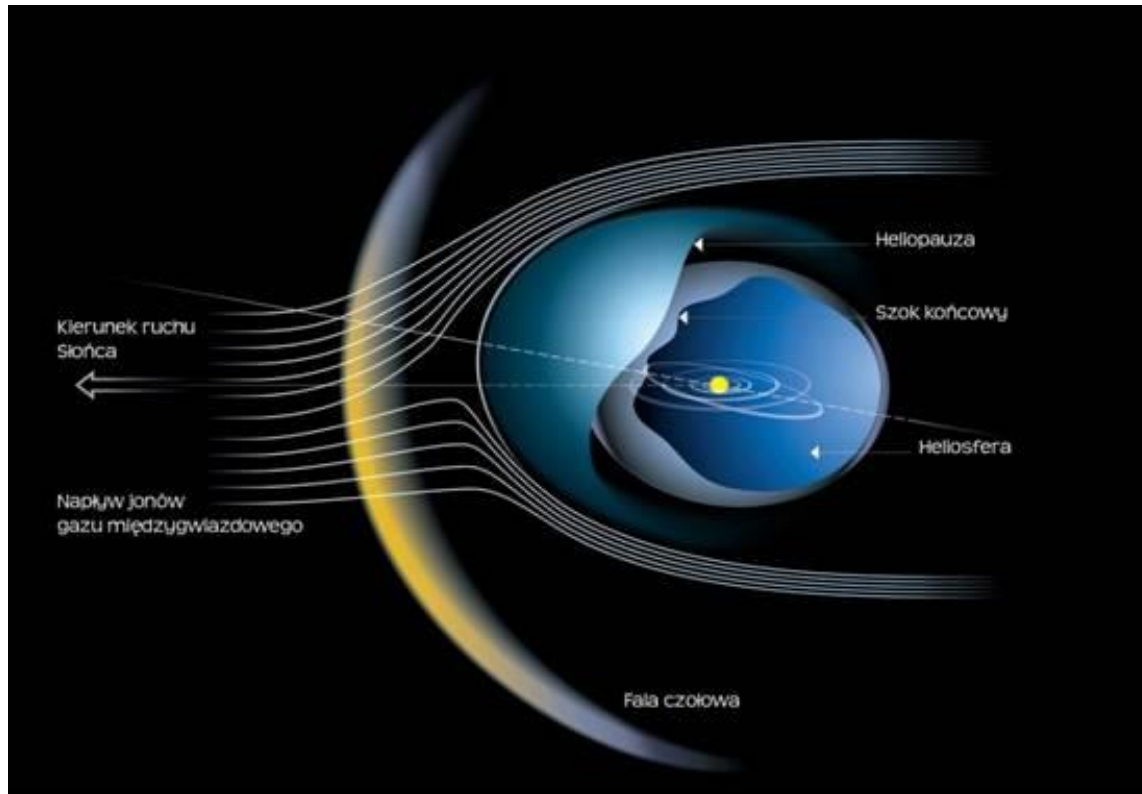
Układ Słoneczny to nasz „kosmiczny kokon”



Voyager 1: 134 J.A. od Ziemi

Zob.: <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl>

Nasze słoneczne „jajo” (heliosfera)

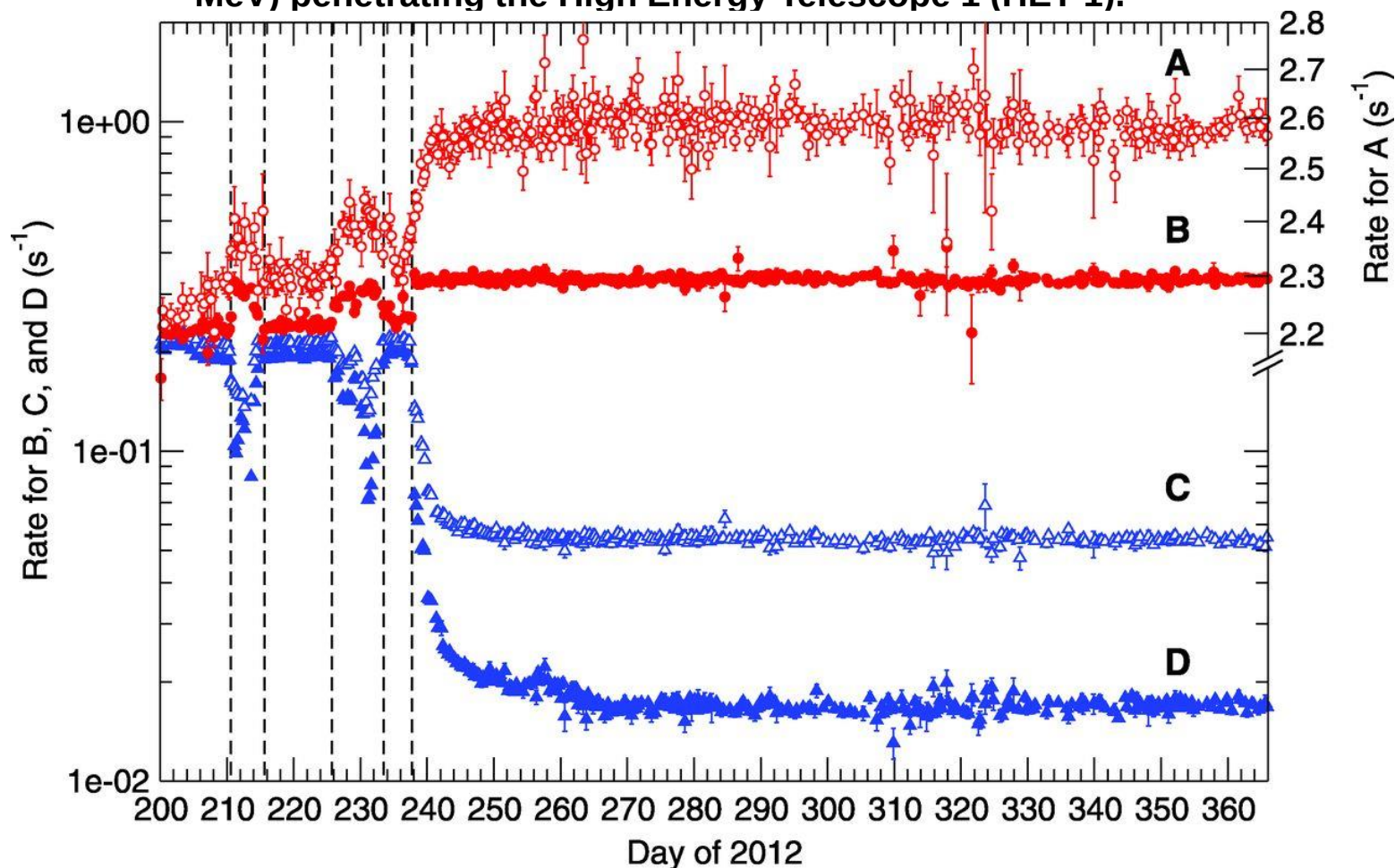


https://www.nasa.gov/mission_pages/voyager/final-frontier.html

<https://sci.esa.int/web/ulysses/-/28659-voyager-1-still-within-the-heliosphere>

<https://voyager.jpl.nasa.gov/>

Fig. 1 The counting rates (6-hour averages) of four different energetic particle species in the vicinity of the depletion region.(A) (y axis on right) GCR nuclei (mainly protons with $E > 70$ MeV) penetrating the High Energy Telescope 1 (HET 1).



23 sierpnia 2012 roku sonda Viking przestała mierzyć wiatr jonów ze Słońca.

E C Stone et al. Science 2013;341:150-153

I dopiero wtedy dmuchnęło energetycznymi jonami z głębi kosmosu

https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/263

Bye-bye pianeta blu!

