



Слънцето: общи x-ки и атмосферни слоеве

д-р Росица Митева

Институт за космически изследвания и технологии – БАН

rmiteva@space.bas.bg

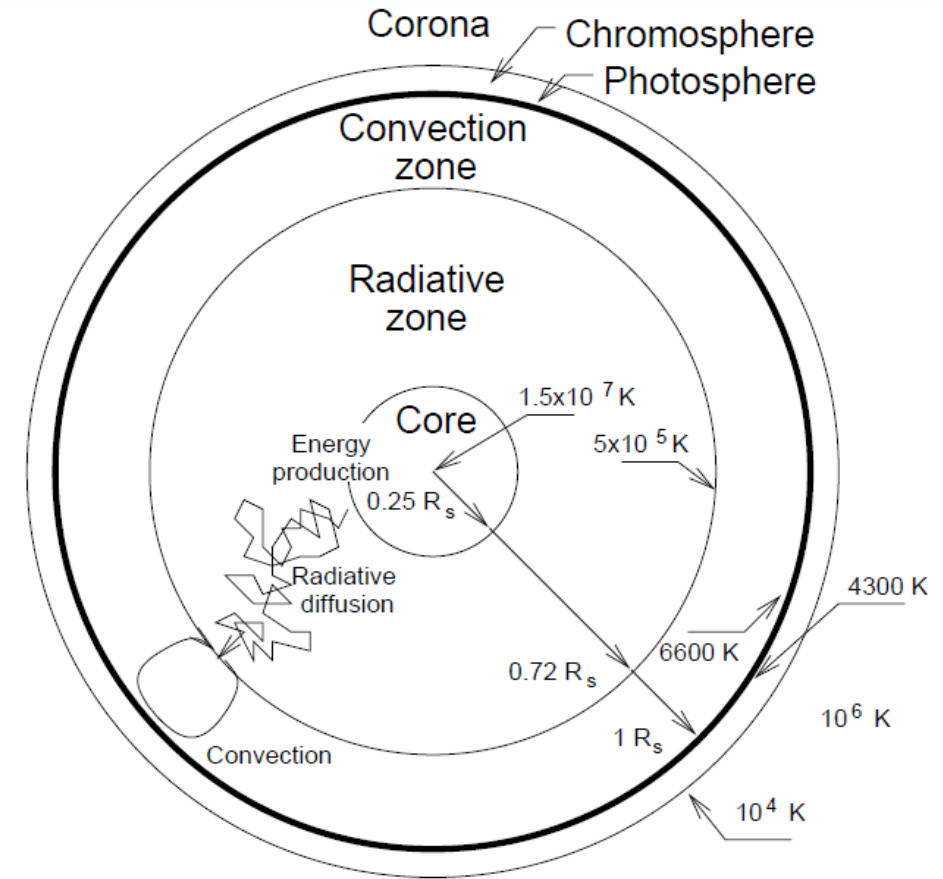
29.11.2018

Важни факти за Слънцето

- Слънцето е **звезда** – най-близката до **Земята**
- Слънчевата светлина достига до Земята за **8.3 минути**
- От създаването на един фотон до излъчването му минават до ~милион години
- Фотоните се създават с енергии $\sim 27 \text{ MeV}$ и след многократно поглъщане и преизлъчване напускат фотосферата като видима светлина (максимум на излъчената енергия)
- Спокойни и активни фази – с цикличност от около 11 години
- Наблюдения в различни дължини (честоти) показват различни области и структури от слънчевата атмосфера
- Повечето от цветовете на слънчевите изображения не са истински

Важни факти за Слънцето

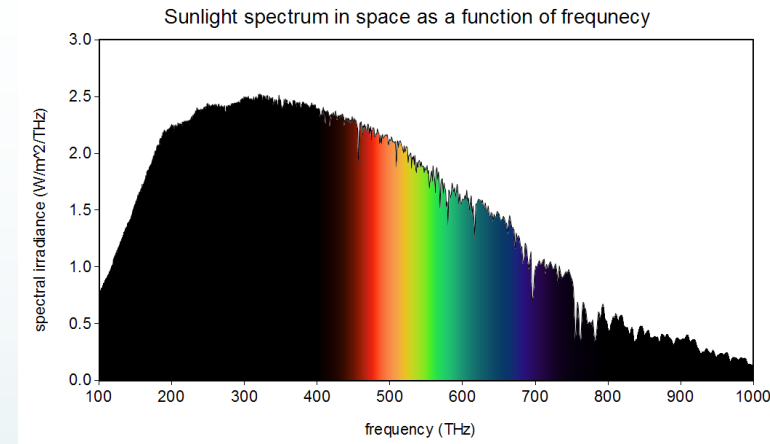
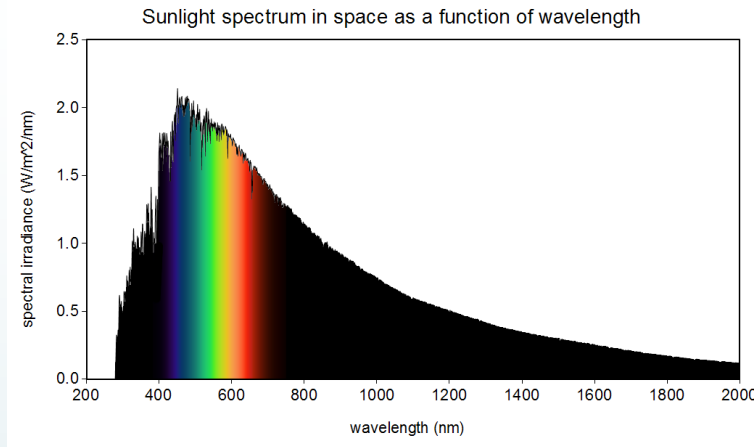
- Age = 4.5×10^9 years
- Mass, $m_{\odot} = 1.99 \times 10^{30}$ kg ($\approx 330\,000\ m_E$, mass of the Earth)
- Radius, $r_{\odot} = 696\,000$ km ($\approx 109\ R_E$, the Earth's radius)
- Average density = $1408\text{ kg/m}^3 = 1.408\text{ g/cm}^3$
- Average distance from the Earth (1 AU) = 150×10^6 km ($215\ r_{\odot}$)
- Gravitational acceleration on surface = 274 m/s^2
- Escape velocity on surface = 618 km/s
- Luminosity = $3.84 \times 10^{26}\text{ W}$
- Rotation period at equator = 26 days
- Mass loss rate $\approx 5 \times 10^9\text{ kg/s}$
 - radiation: $4 \times 10^9\text{ kg/s}$;
 - solar wind: $1 \times 10^9\text{ kg/s}$
- Effective black body temperature = 5778 K



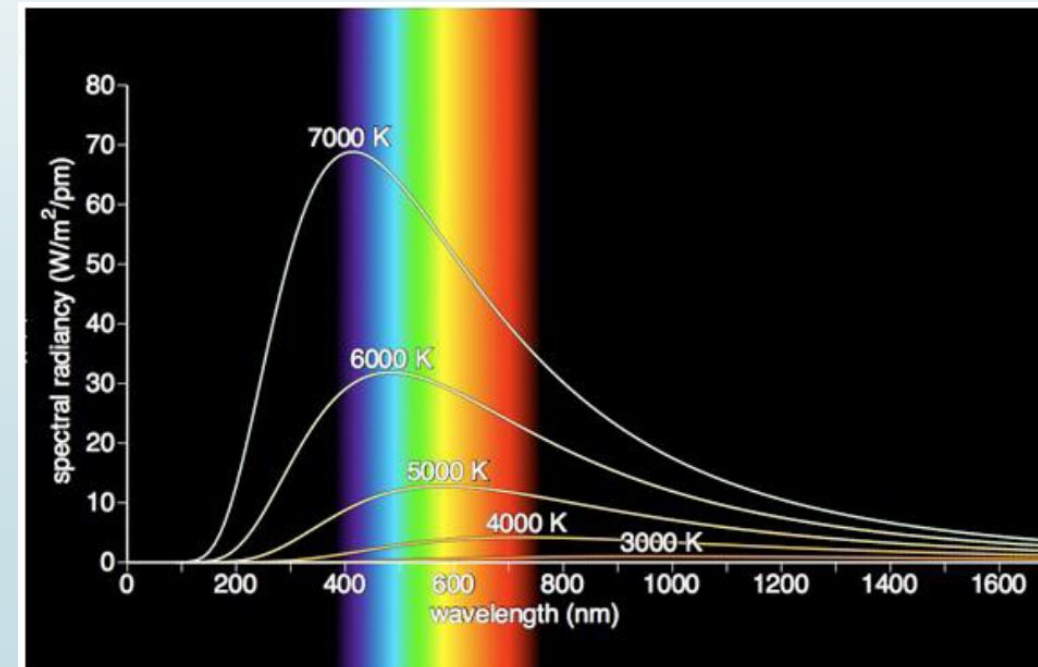
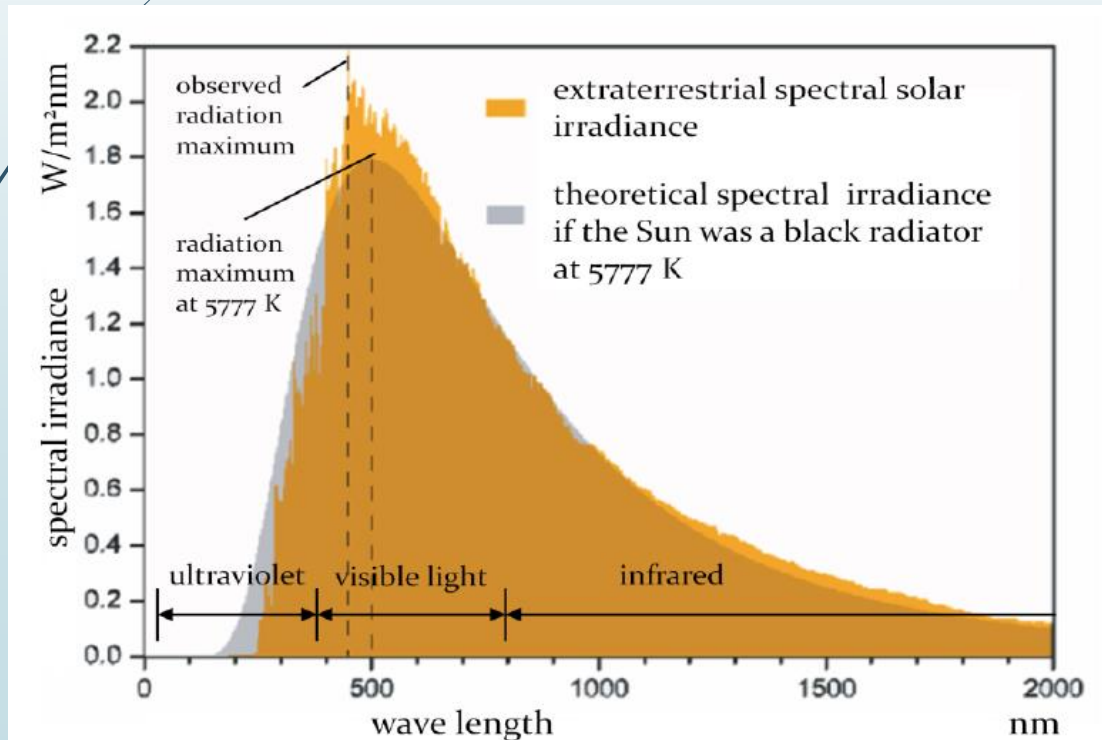
Koskinen & Vainio, Lectures 2011

Цветът на Слънцето – спектър на лъчение

„... its spectrum peaks in the violet in wavelength space, in the infrared in frequency space, and in the green according to the wavelength-space blackbody approximation.“

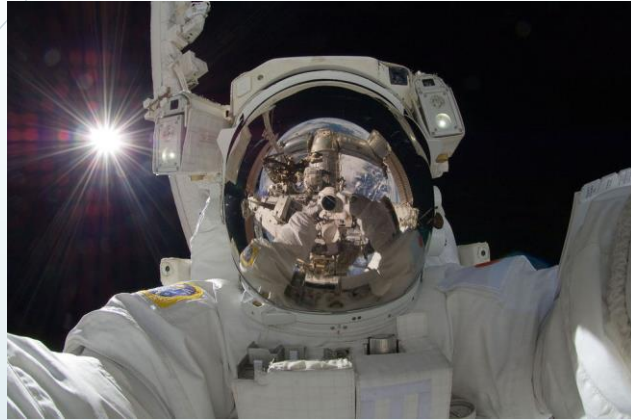


<http://wtamu.edu/~cbaird/sq/2013/07/03/what-is-the-color-of-the-sun/>



Stephen Ramsden

Цветът на Слънцето – през какво наблюдаваме



бяло (от космоса)

Aki Hoshide

<https://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/station/crew-32/html/iss032e025258.html>



ЖЪЛТО (ВИДИМ ЦВЯТ)

<http://ws-sozopol.stil.bas.bg/>



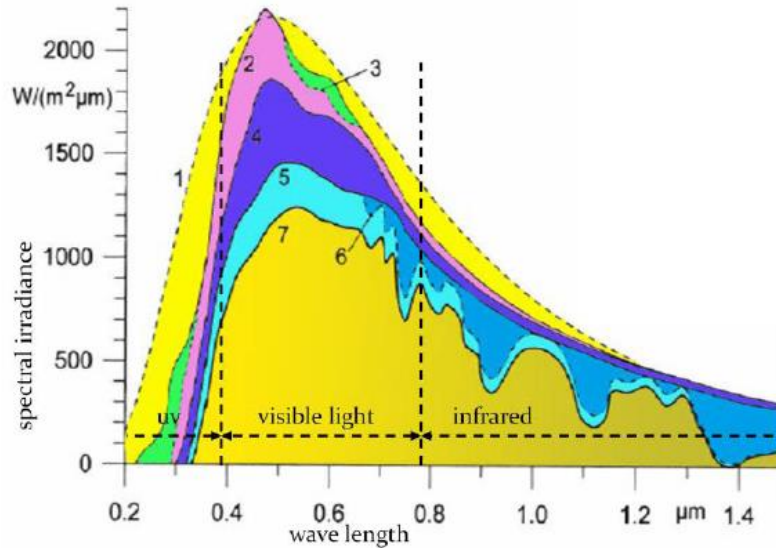
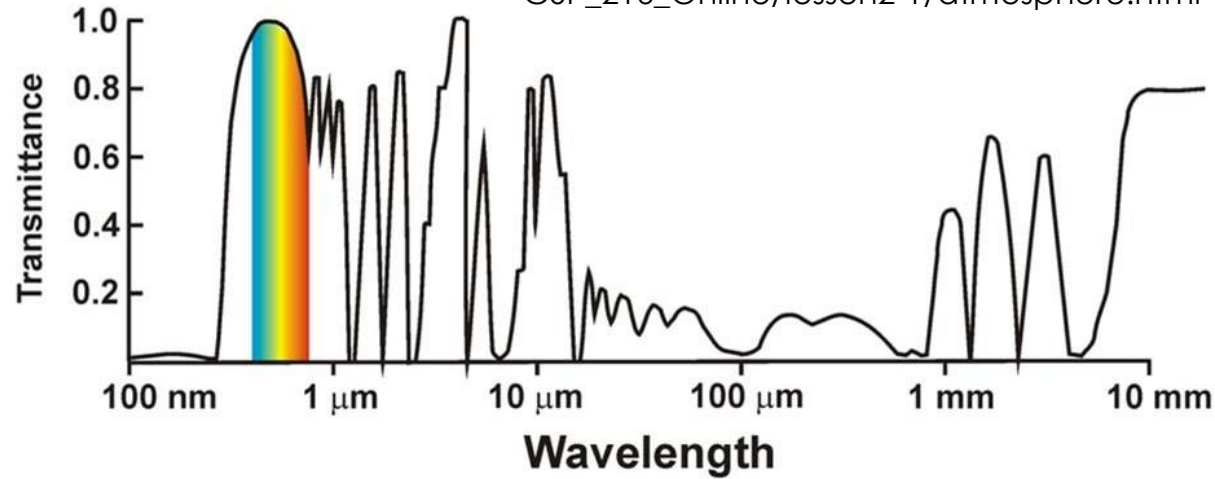
Червено (ВИДИМ ЦВЯТ БЛИЗО ДО ХОРИЗОНТА)

<https://astrobob.areavoices.com/2012/08/26/what-color-is-the-sun/>

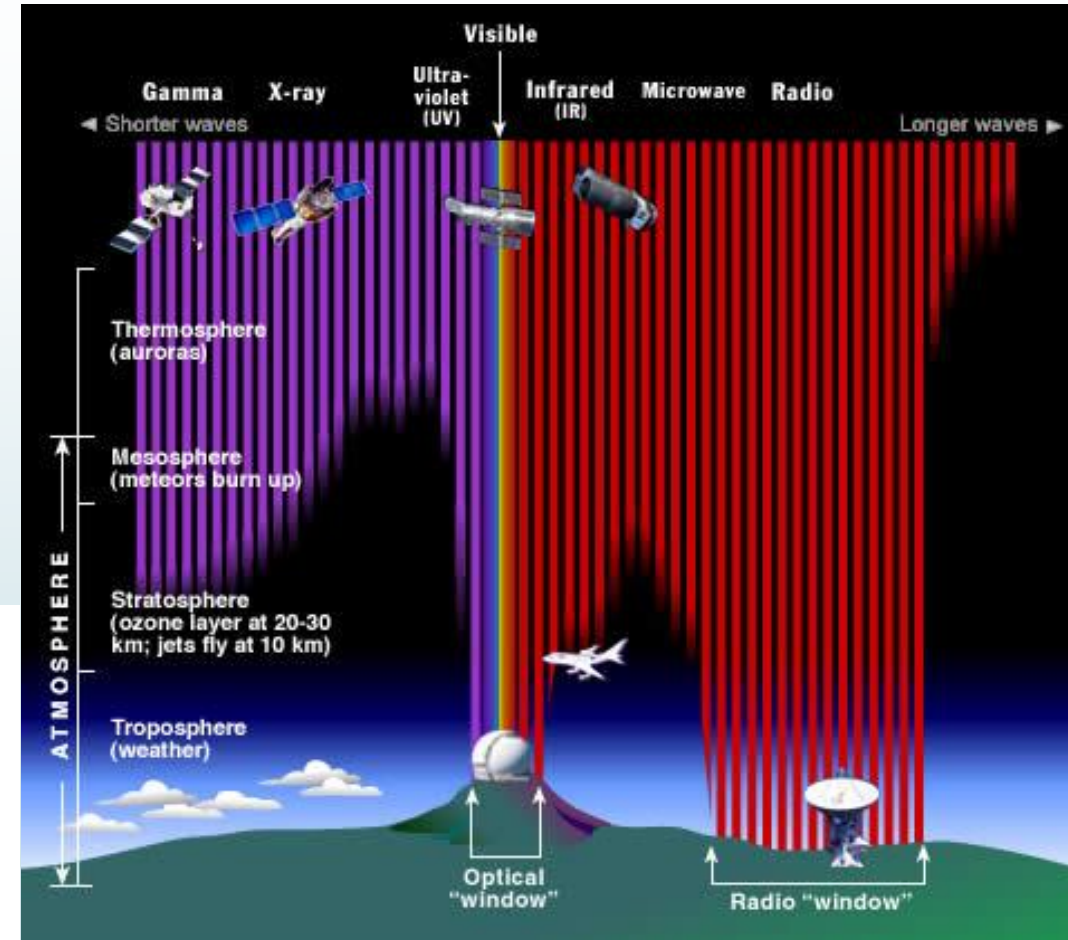
Цветът на Слънцето – през какво наблюдаваме

Пропускане на земната атмосфера

http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson2-1/atmosphere.html



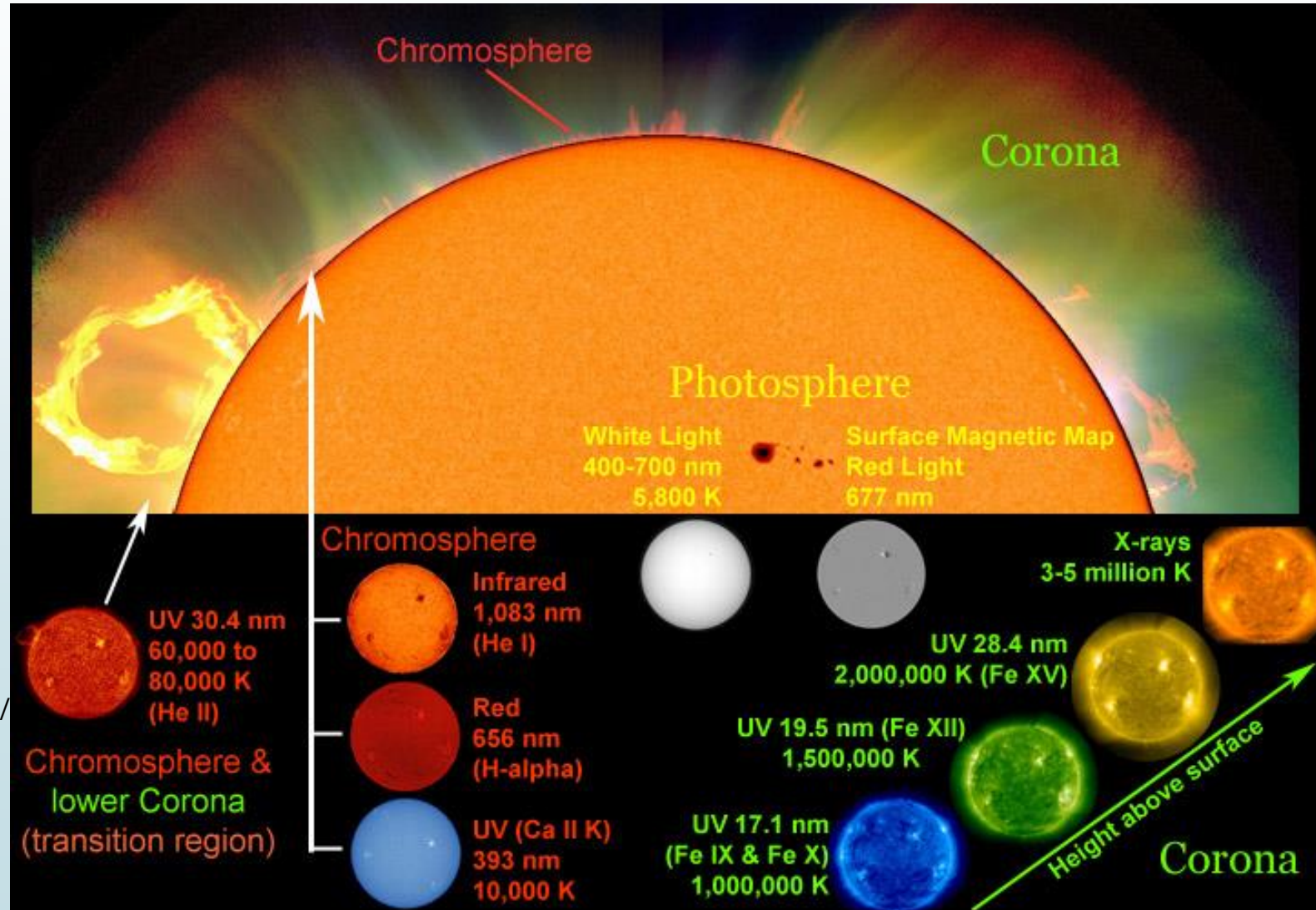
- 1 Planck curve at $T=5780$ K at mean Sun-Earth distance
- 2 Extraterrestrial solar spectrum
- 3 Absorption by ozone
- 4 Absorption by biatomic oxygen and nitrogen
- 5 Scattering by aerosols
- 6 Absorption by water vapour
- 7 Maximum radiation reaching the ground (without additional extinction by aerosols and clouds)



<https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>

Цветът на Слънцето – на каква честота/дължина наблюдаваме

Слънцето излъчва от гама до радио вълни в периоди на активност



Randy Russell
www.windows2universe.org/sun/images

Кратка история на Слънцето: $G2V$, $M=4.5$, $m=-26.5$

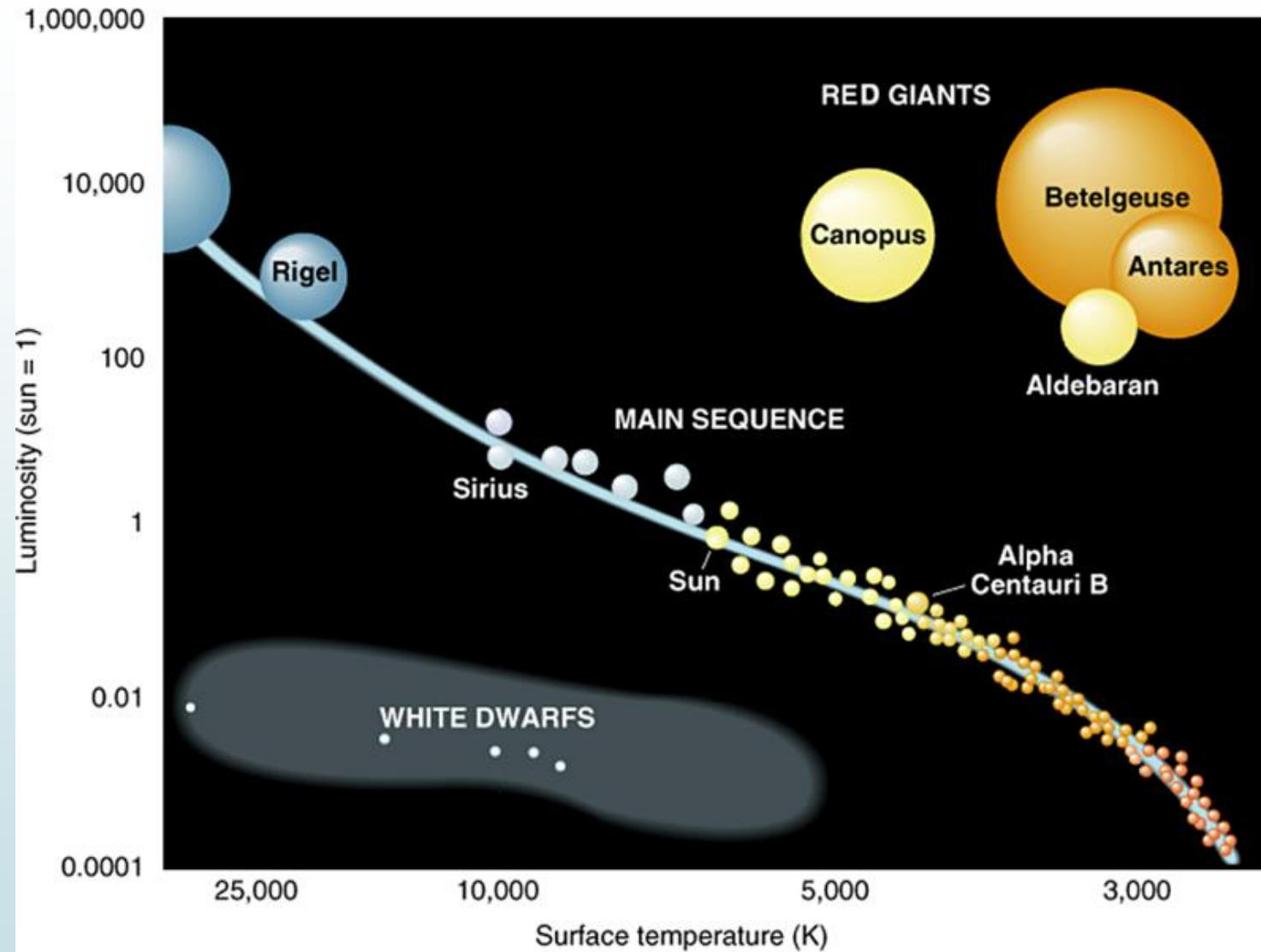
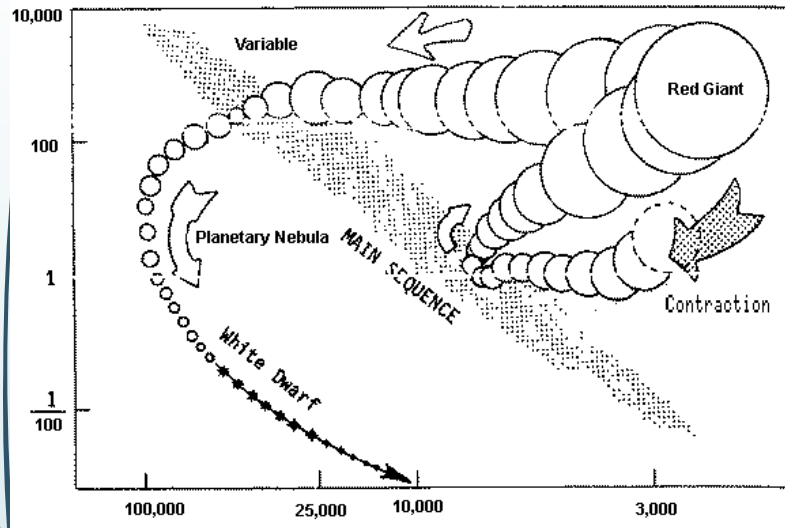
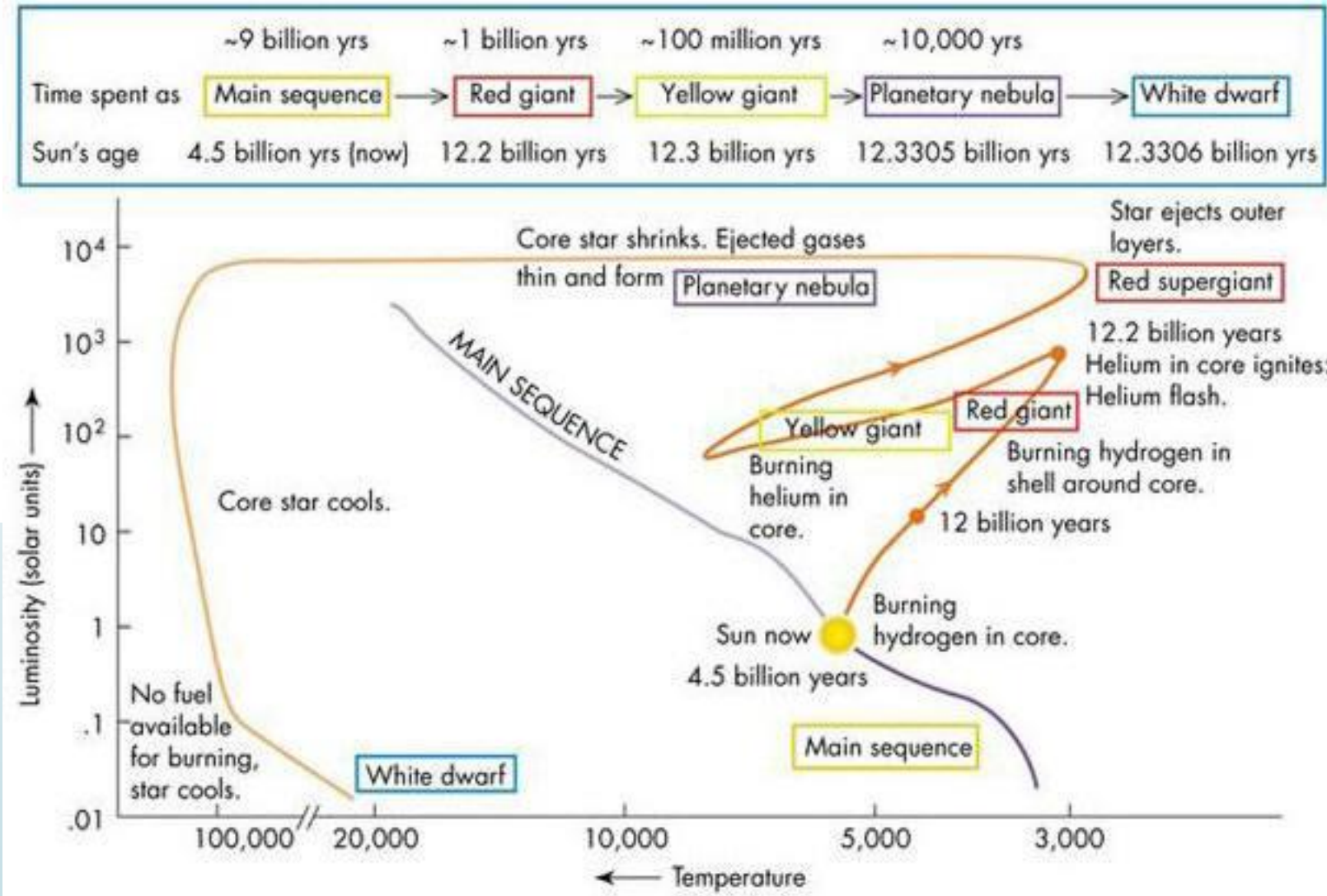


Figure 1 - The Hertzsprung-Russell Diagram. Dim cool stars are at the lower-right, bright hot stars are at the upper-left. The sizes shown for the stars are suggestive, not exact.

Кратка история на Слънцето: G2V, $M=4.5$, $m=-26.5$



<http://web.missouri.edu/~speckan/witch-stuff/Research/chapter2/node4.html>

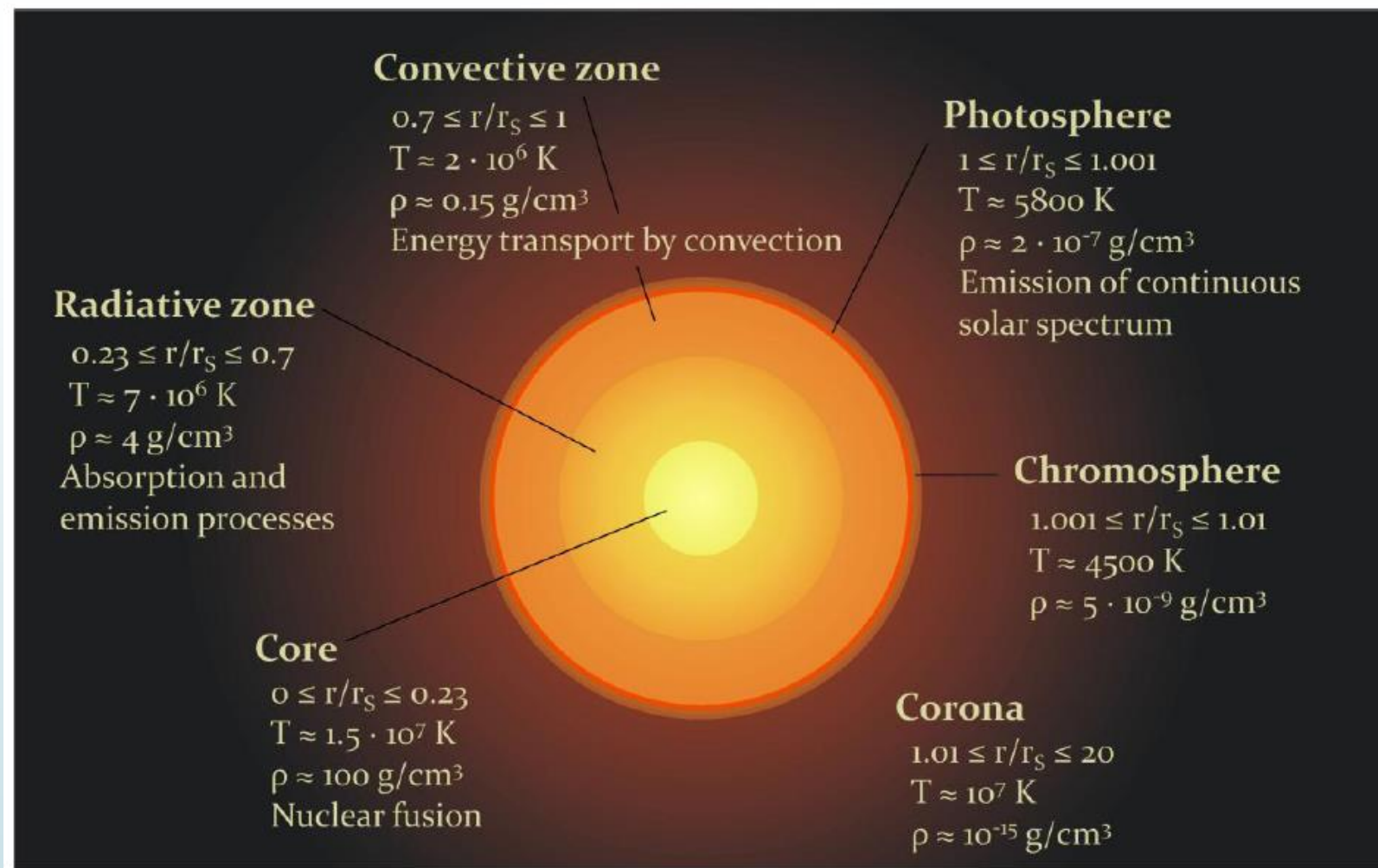


<https://www.physics.byu.edu/faculty/christensen/Physics%20127/Figures/Stellar%20Evolution/Post-Main-Sequence%20Evolutionary%20Track%20for%20a%20Sun-Like%20Star.htm>

Вътрешна структура

<http://www.energy-science.org/bibliotheque/cours/1361469594Chapter%2002%20radiation.pdf>

- Ядро (core)
- Слой на лъчист пренос (radiative zone)
- tachocline
- Конвективен слой (convection zone)



https://sites.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO_122/lect8/lecture8.html

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

Термоядрен синтез

Fusion of hydrogen into helium in different types of reactions:

(most important: proton-proton chain, less frequent: carbon-nitrogen-oxygen chain)

Composition of the Sun

hydrogen	75 wt ⁰ %
helium	23 wt ⁰ %
others	2 wt ⁰ %

Summarized reaction equation:



(e^+ ... positron, ν ... neutrino, Δm ... mass defect)

Released energy per reaction: $\Delta m c^2 \approx 26.7 \text{ MeV} \approx 4.3 \cdot 10^{-12} \text{ J}$



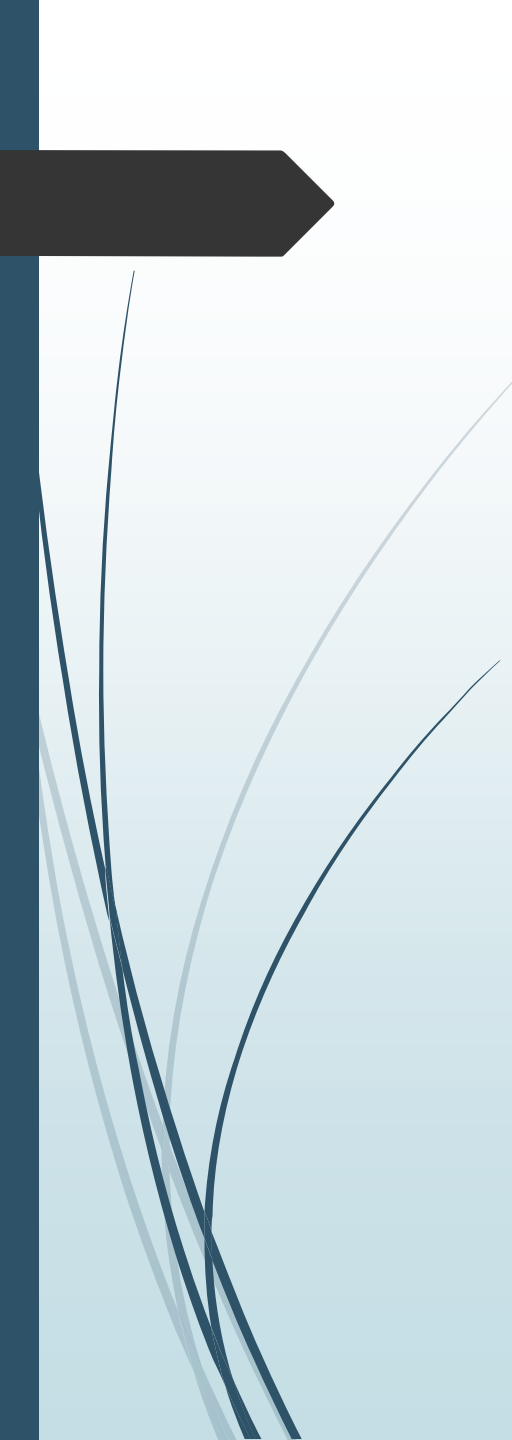
Solar mass defect per second: $4.3 \cdot 10^9 \text{ kg}$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \text{Power: } P &= \Delta m / \Delta t \cdot c^2 = 4.3 \cdot 10^9 \text{ kg/s} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 3.85 \cdot 10^{26} \text{ W} \end{aligned}$$



Наблюдения

- <https://solarmonitor.org/>
- <https://helioviewer.org/>
- http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events/
- <http://www.lmsal.com/hek/index.html>
- https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_telescopes
- <https://www.nso.edu/>
- <http://www.bbso.njit.edu/Research/FDHA/>
- <http://cesar.kso.ac.at/>
- <http://secchirh.obspm.fr/>
- <http://www.e-callisto.org/>



Избрани слънчеви мисии

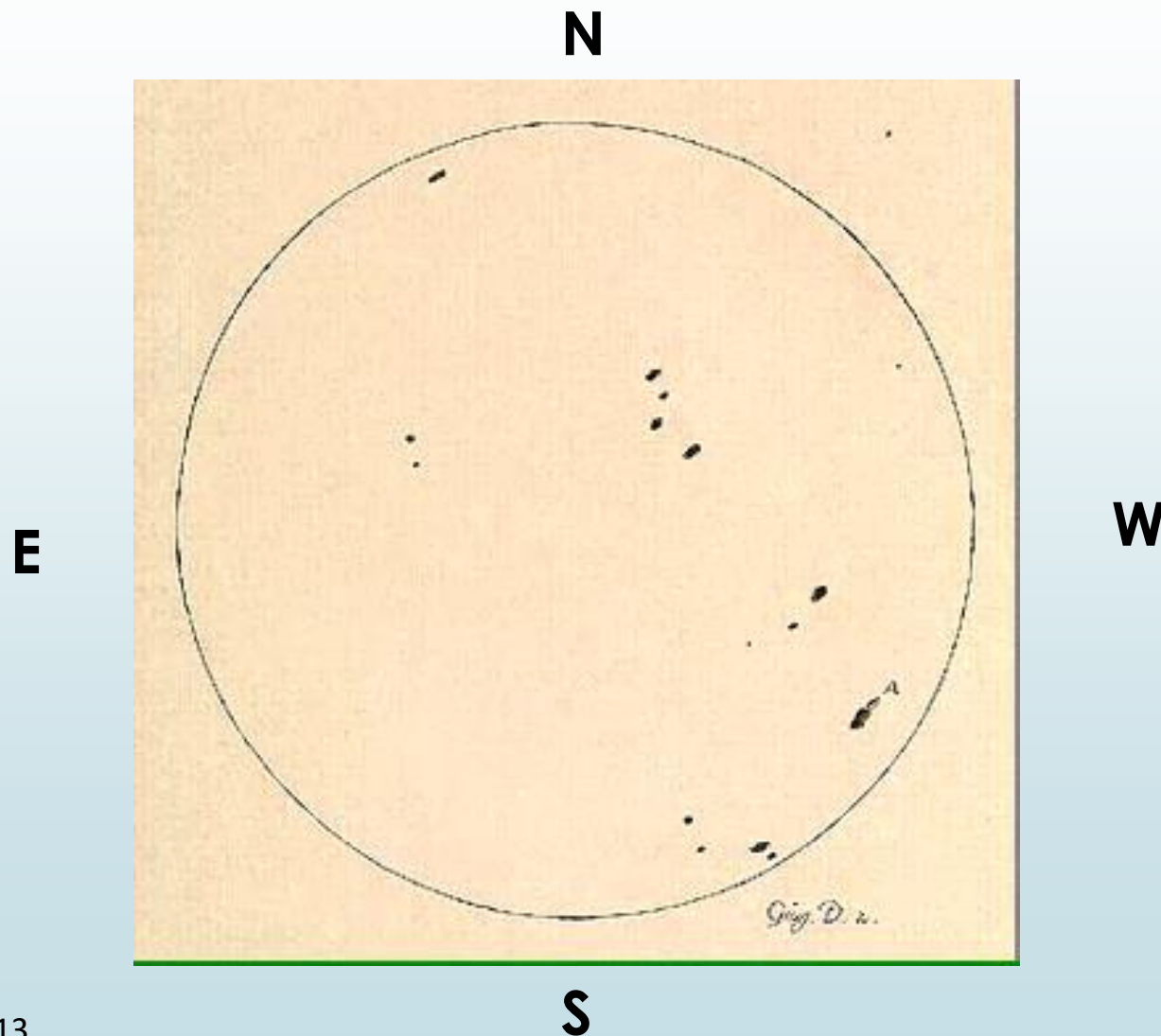
(самостоятелна работа)

http://www.scholarpedia.org/article/Solar_Satellites

- **GOES**
- *(Yohkoh)*
- *(TRACE)*
- **SOHO**
- **ACE**
- **Wind**
- *(RHESSI) → Fermi*
- Hinode
- **STEREO A&B**
- **SDO**
- DSCOVR

- Parker solar probe (12.08.2018); Solar Orbiter (2020?); Solar C(?)

Слънчев диск – конвенция за посоките

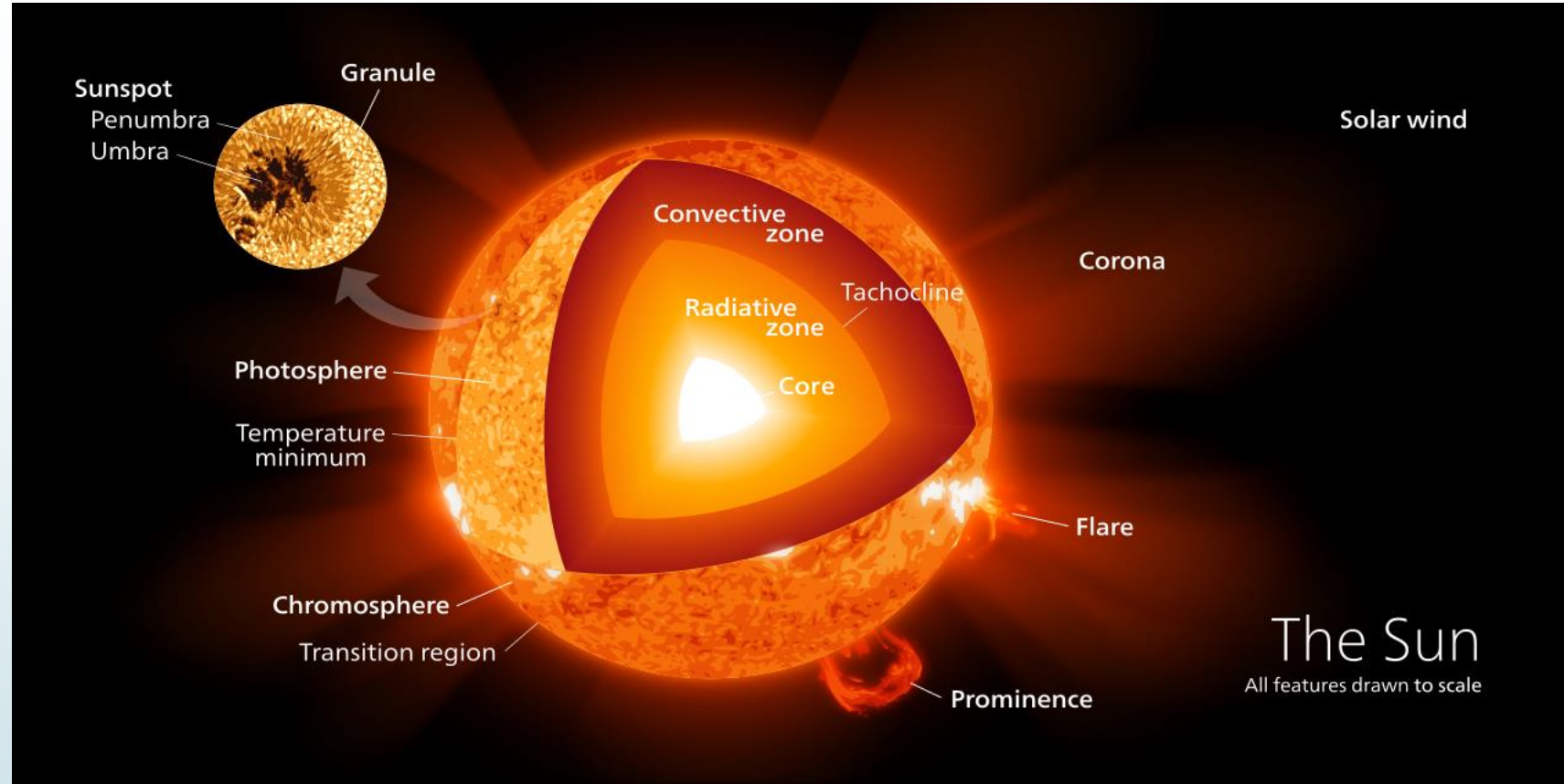
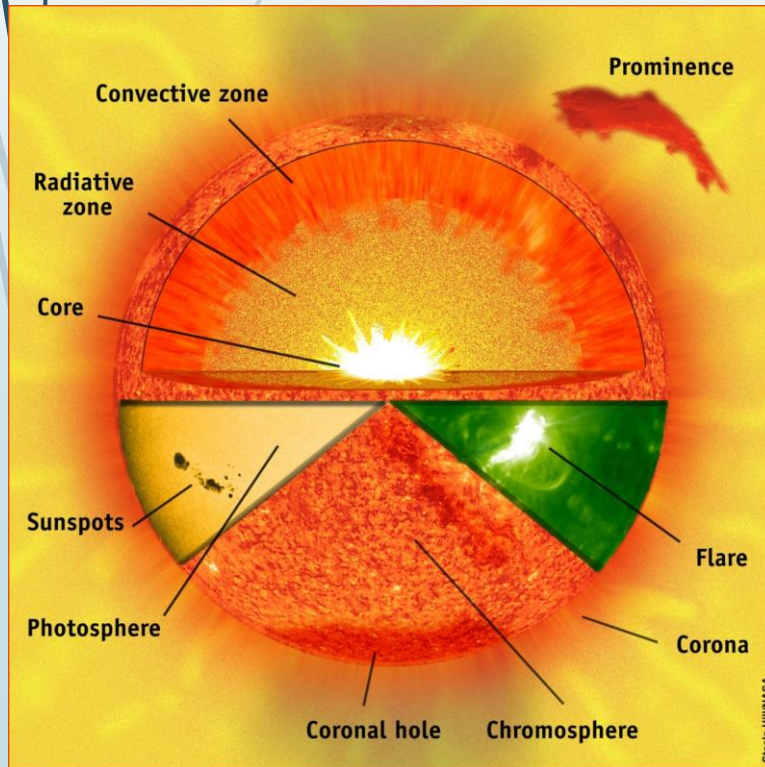


Галилей, 23-06-1613

http://galileo.rice.edu/sci/observations/sunspot_drawings.html

Строеж на слънчевата атмосфера

- Фотосфера
- Хромосфера
- Преходен слой
- Корона
- Слънчев вятър



<https://en.wikipedia.org/wiki/Sun>

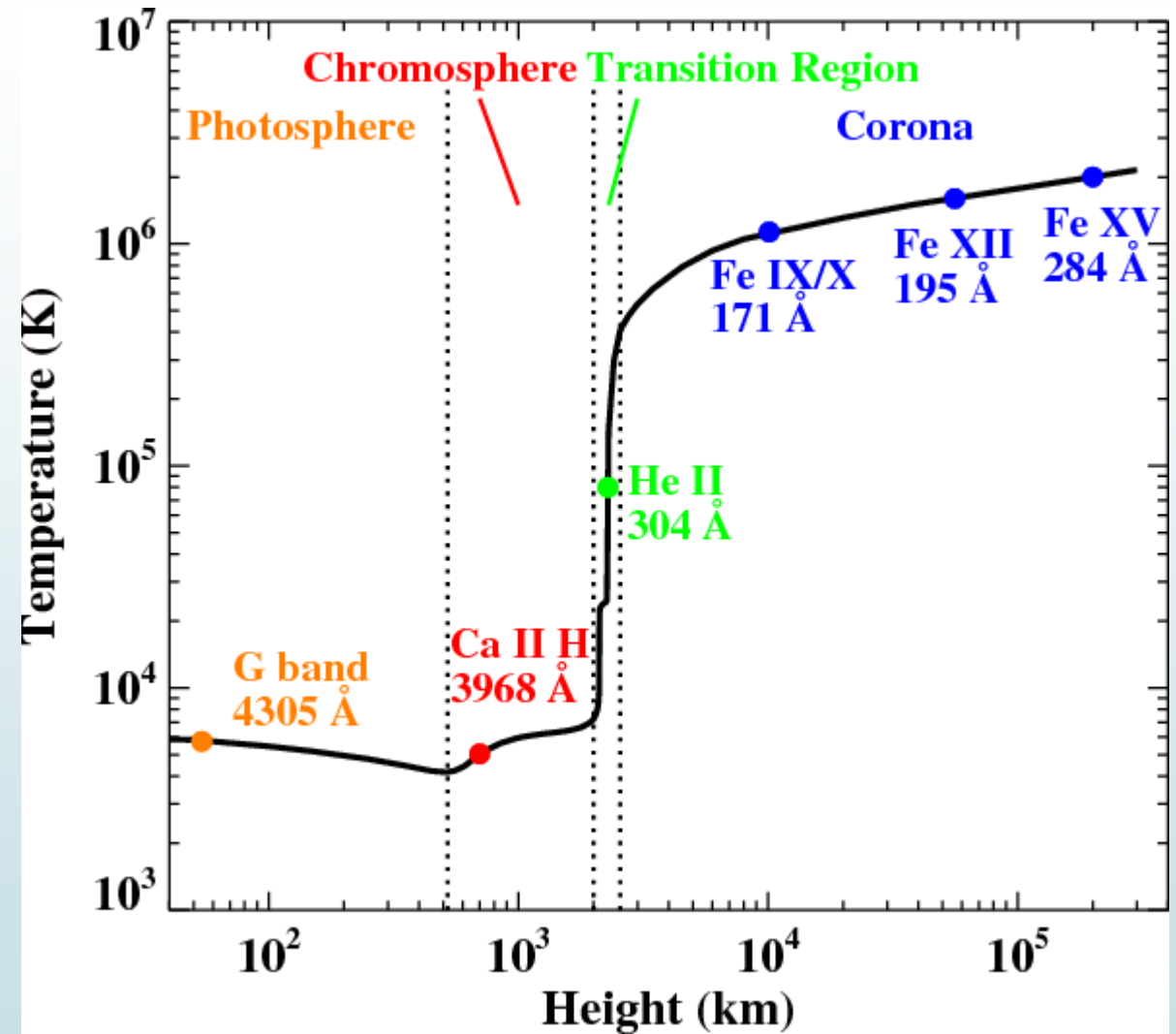
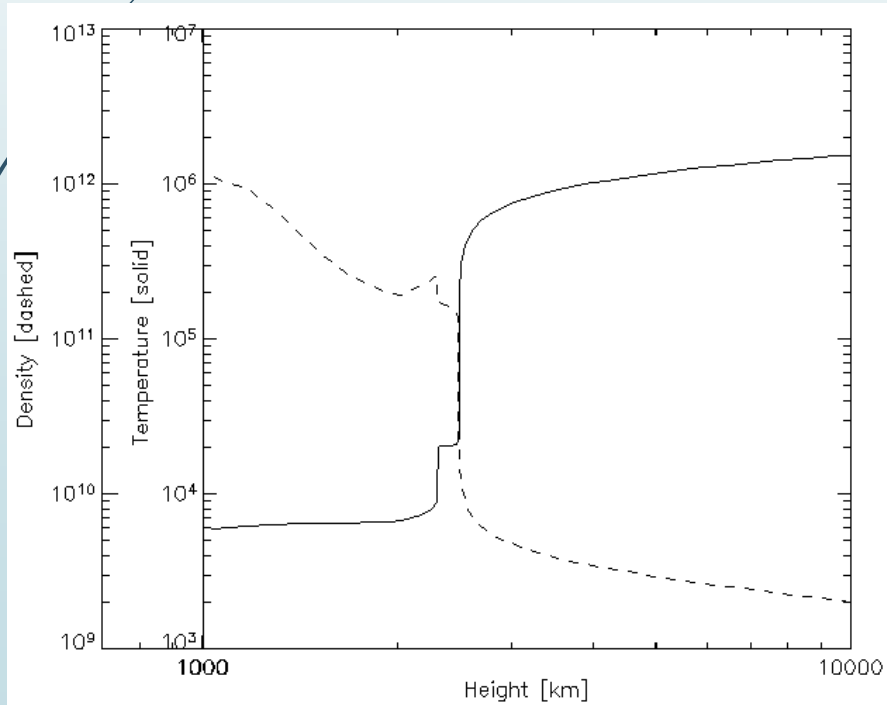
<http://www2.gi.alaska.edu/~jvo/P472G/SolarAtmosphere.pdf>

<http://www.thesuntoday.org/the-sun/solar-structure/>

Строеж на слънчевата атмосфера

- Фотосфера
- Хромосфера
- Преходен слой
- Корона
- Слънчев вятър

<http://www2.gi.alaska.edu/~jvo/P472G/SolarAtmosphere.pdf>
<https://web.njit.edu/~gary/728/Lecture10.html>



Yang et al. 2019, A&A

Спектрални линии

In 1859 Kirchhoff formulated the general laws governing the production of spectrum:

1. The ratio of emissivity to absorptivity is independent of the composition of the material and depends only on the temperature and wavelength.
2. An opaque body radiates a continuous spectrum.
3. A transparent gas radiates an emission spectrum that is distinct for each chemical element.
4. An opaque body surrounded by a gas of low emissivity shows a continuous spectrum crossed by absorption lines corresponding the spectrum of the gas.
5. If the gas has high emissivity, the continuous spectrum will be crossed by bright lines

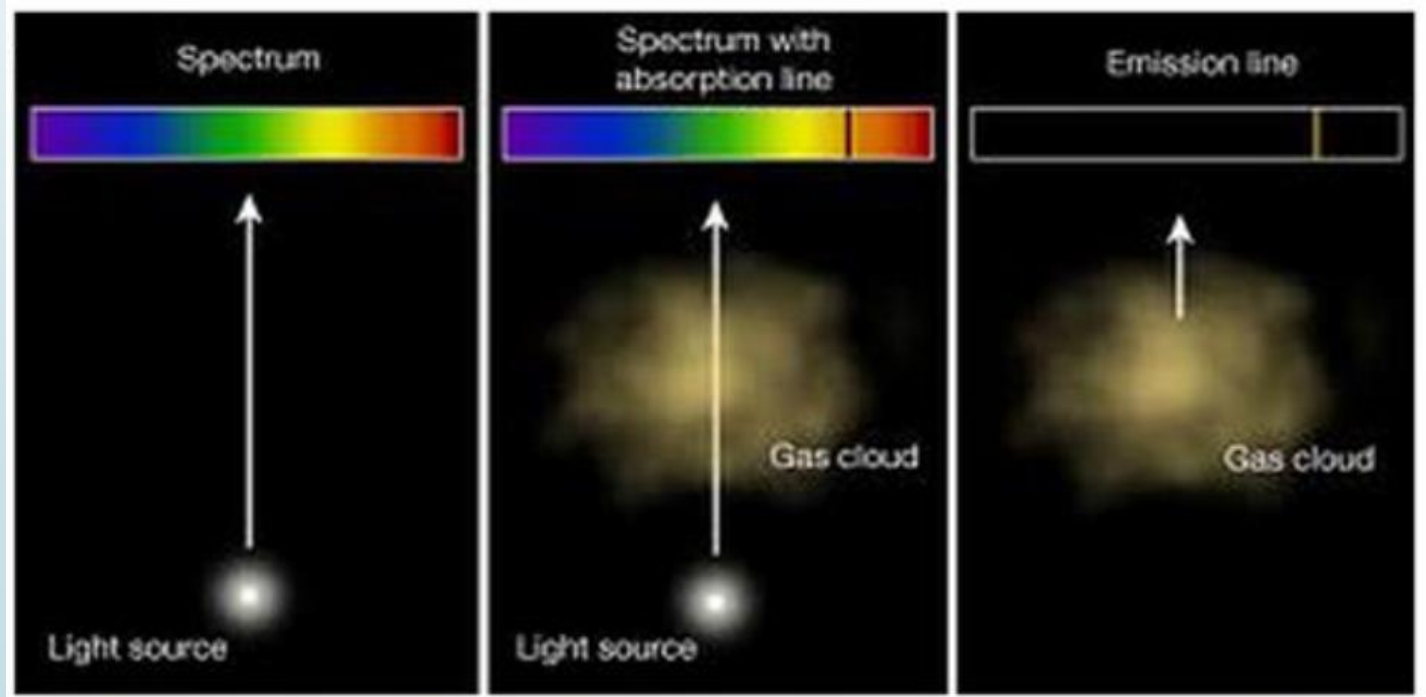
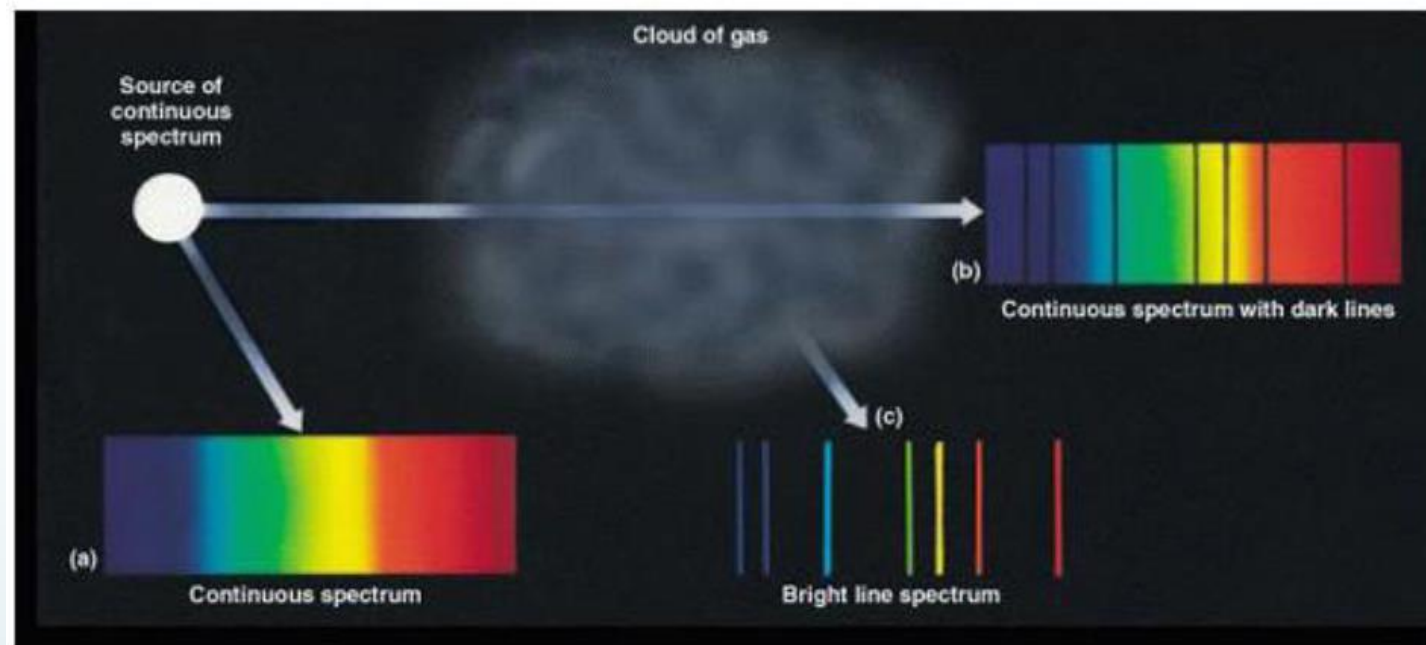
→ фотосфера

→ структури над
лимба, корона

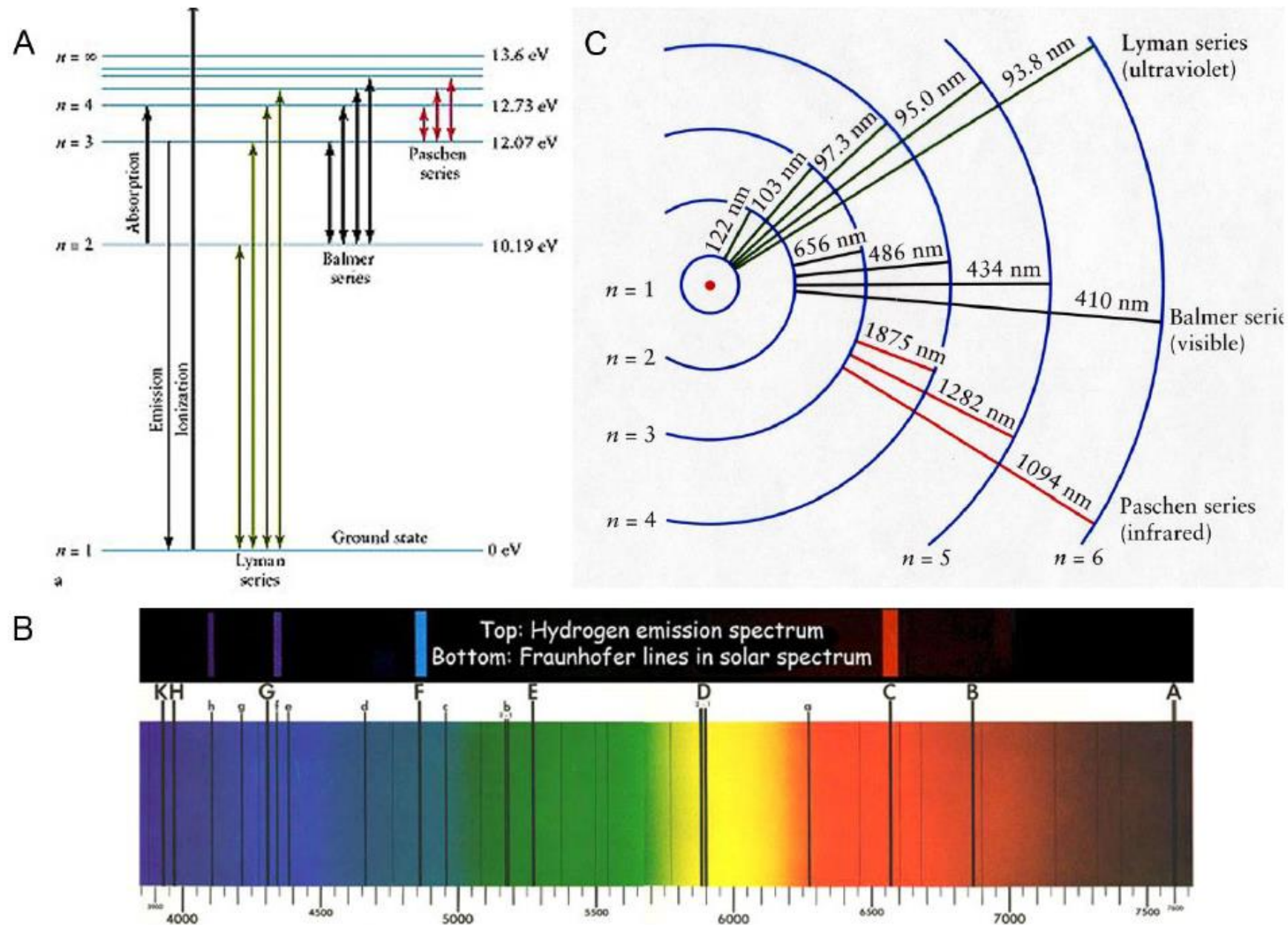
→ фотосфера

→ хромосфера

Спектрални линии

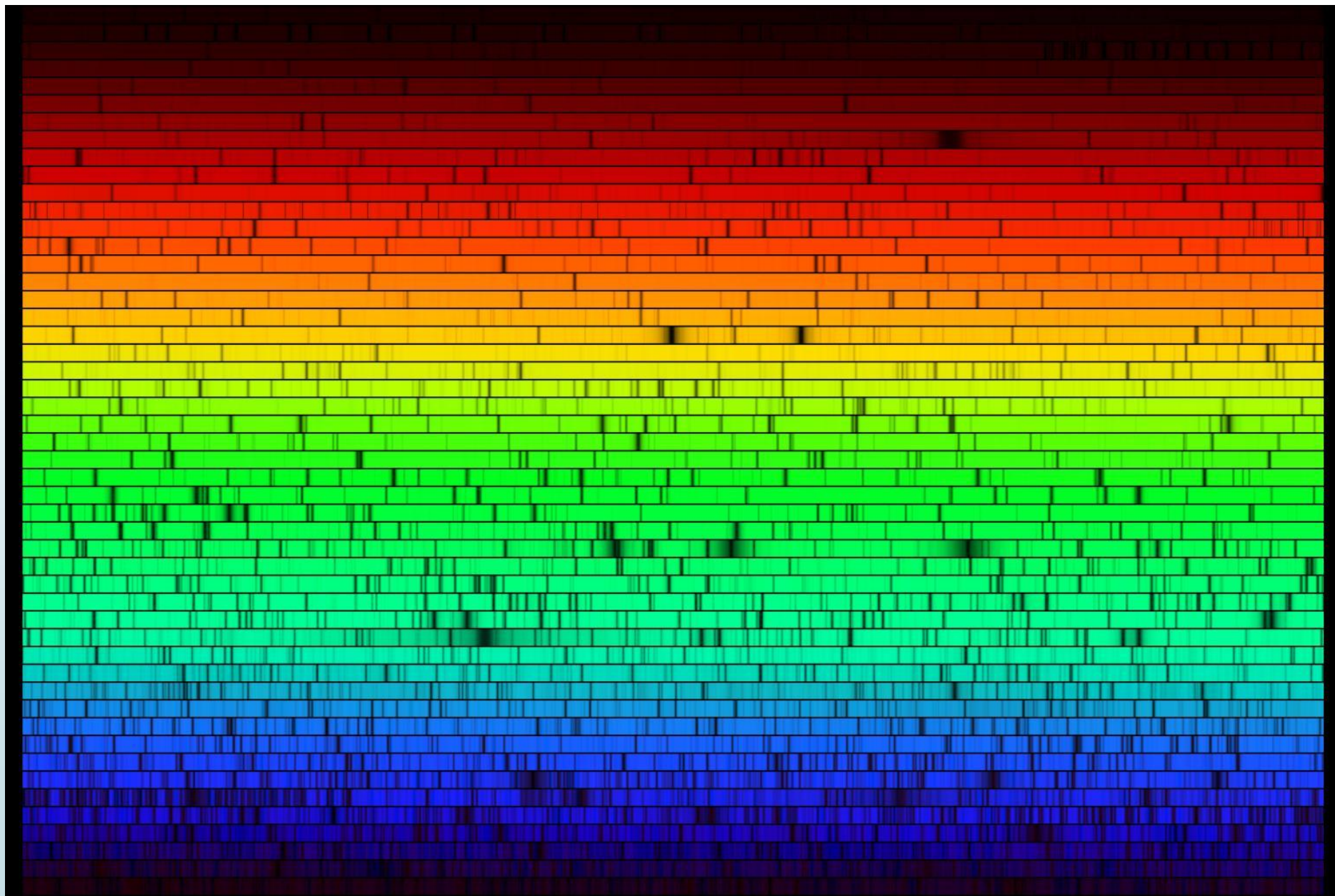


Спектрални линии

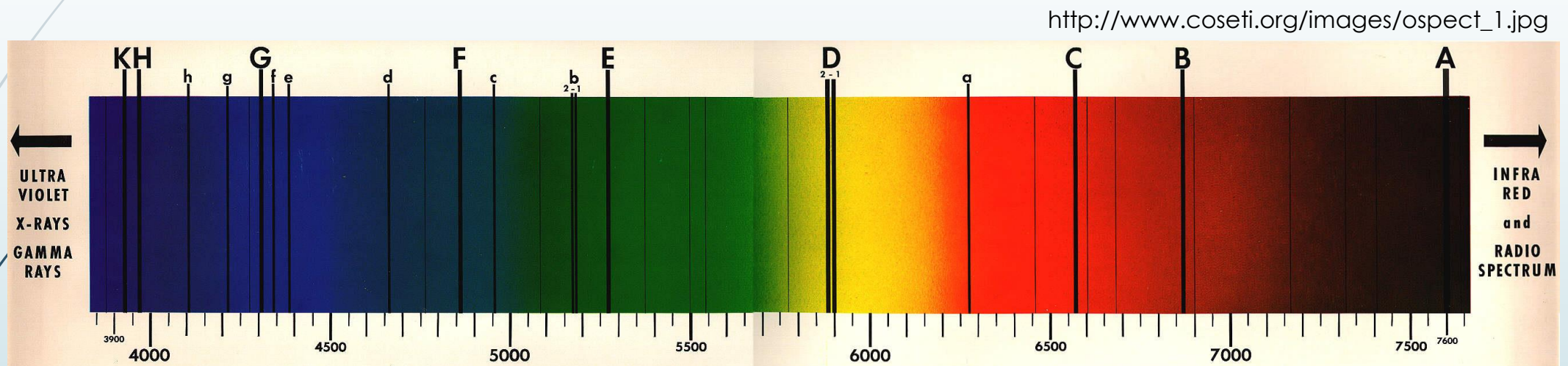


Фотосфера: Фраунхоферови линии

https://www.noao.edu/image_gallery/html/im0600.html



Фотосфера: Фраунхоферови линии



Ca II: K&H

H β : F

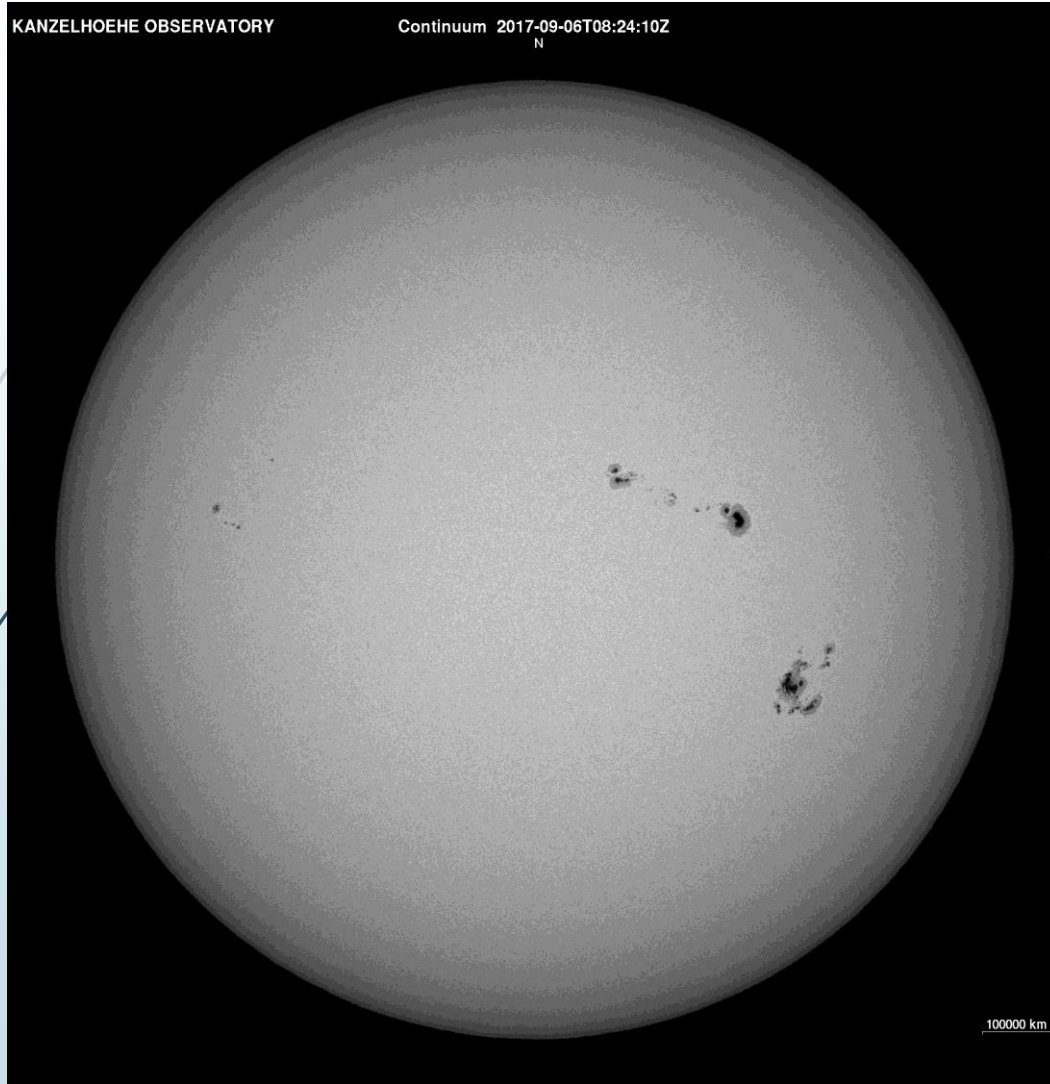
Na: D

H α : C

ОСНОВНИ ЛИНИИ

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

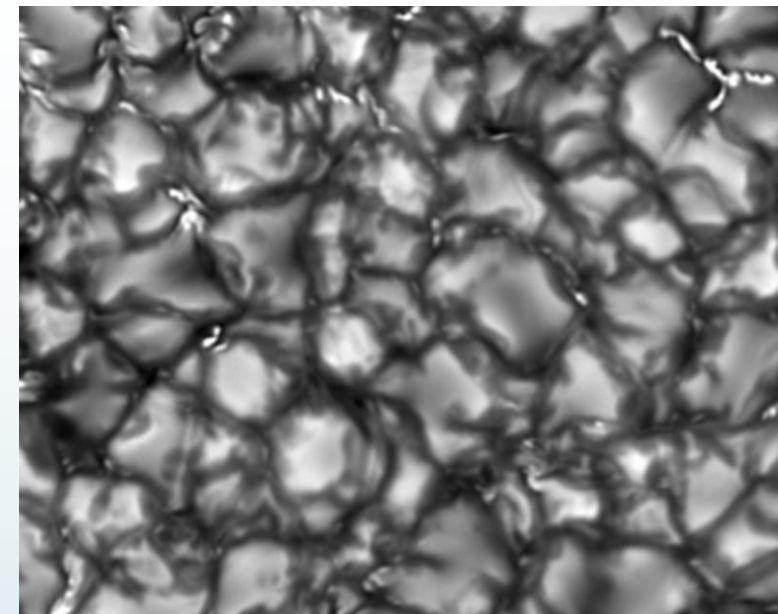
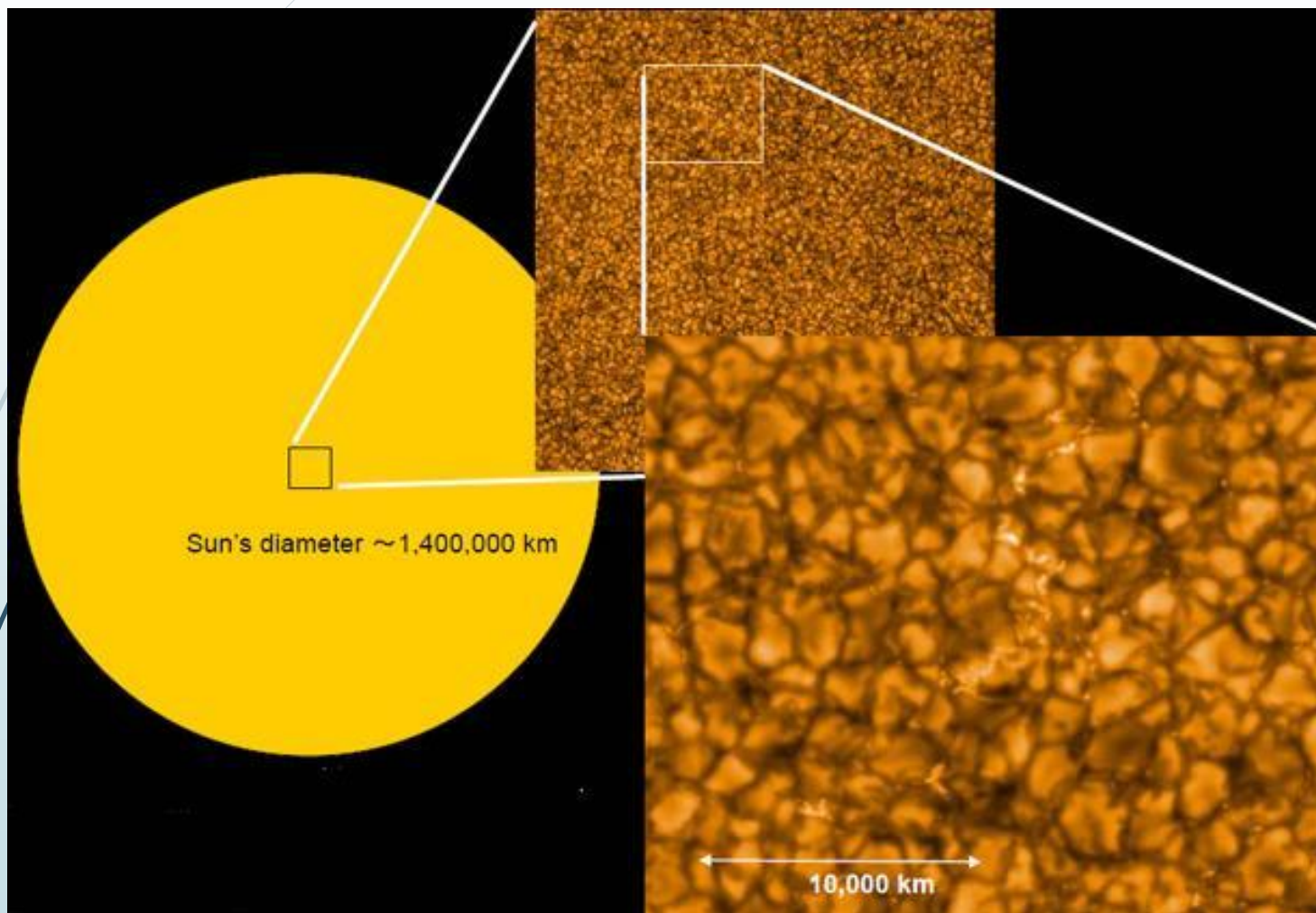
Фотосфера



- „фотос“ – от гр. за светлина
- Видимата повърхност на Слънцето
- Най-ниския атмосфернен слой, който може да наблюдаваме
- Лъчение във видима (бяла) светлина
- Тънка обвивка с дебелина около 500–550 km над конвективната зона:
 - дължината на свободен пробег на фотоните = на скалата на височина на атмосферата
 - оптичната плътност на $5000 \text{ \AA}$ е 1
- Потъмняване на лимба (наблюдаваме лъчение от по-висок слой, който е с по-ниска температура)

Фотосфера: грануляция

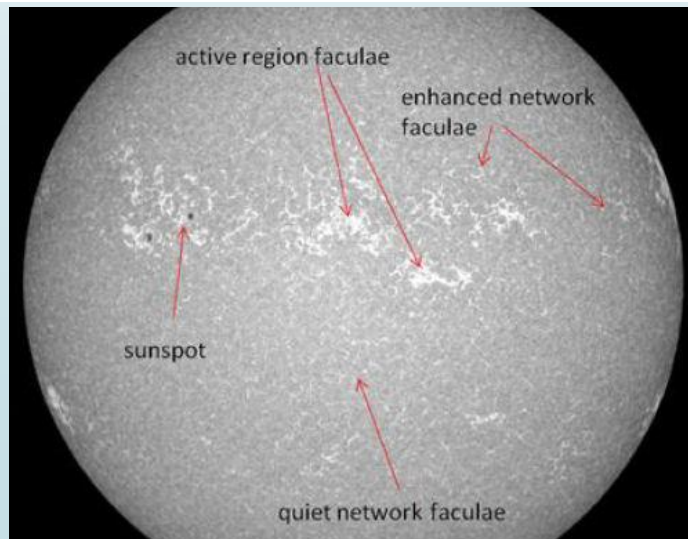
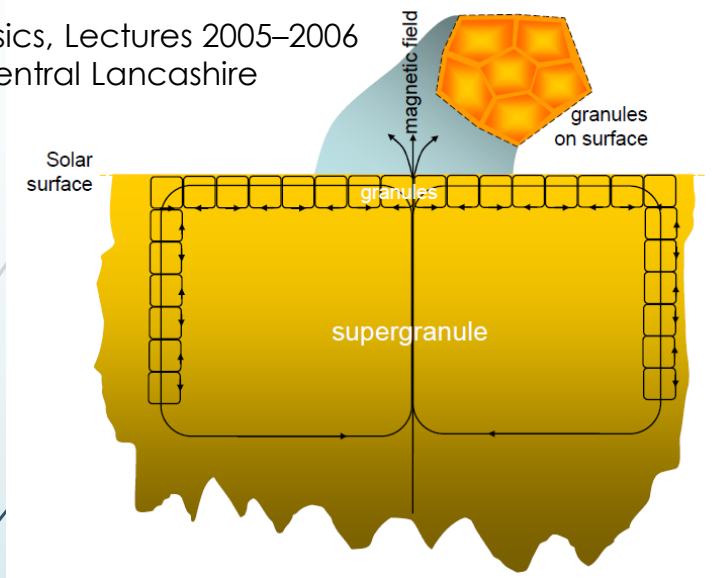
Swedish Solar Telescope
granulation, 2010
<http://www.isf.astro.su.se/>



- Постоянна клетъчна структура: 10^6 на брой
- размер: 700–1500 km
- Времетраене: 8–15 min
- Радиални потоци от гореща плазма от конвективната зона в центъра (излъчване на енергия, ярки в центъра) и спускане към периферията на гранулата (потъмня част, по-хладна плазма)

Фотосфера: мезогрануляция, свръхгрануляция, фотосферна мрежа, слънчеви петна

Solar astrophysics, Lectures 2005–2006
University of Central Lancashire



P. Foukal, Heliophysics, Inc.

Mesogranulation

- Едромащабни структури: размери 10000 km
- Доплерови движения с 60 m/s
- Период: 5 min
- По спектрокопични наблюдения близо до центъра на слънчевия диск
- Не са свързани с грануляцията

Supergranulation

- Спектрохелиограми – в някои фраунхоферови линии (а не в бяла светлина): 20000–55000 km, близо до лимба
- Период: 1–2 денонощия
- Свързани със слоеве от конвективната зона
- $\uparrow 0.1 \text{ km/s} \rightarrow 0.3\text{--}0.4 \text{ km/s} \downarrow 0.1\text{--}0.2 \text{ km/s}$

Фотосферна мрежа

- На границите на фотосферните фонови магнитни полета, $B \approx 2000 \text{ G}$
- Близо до лимба – като фотосферни „факели“

Faculae – ярки фотосферни области

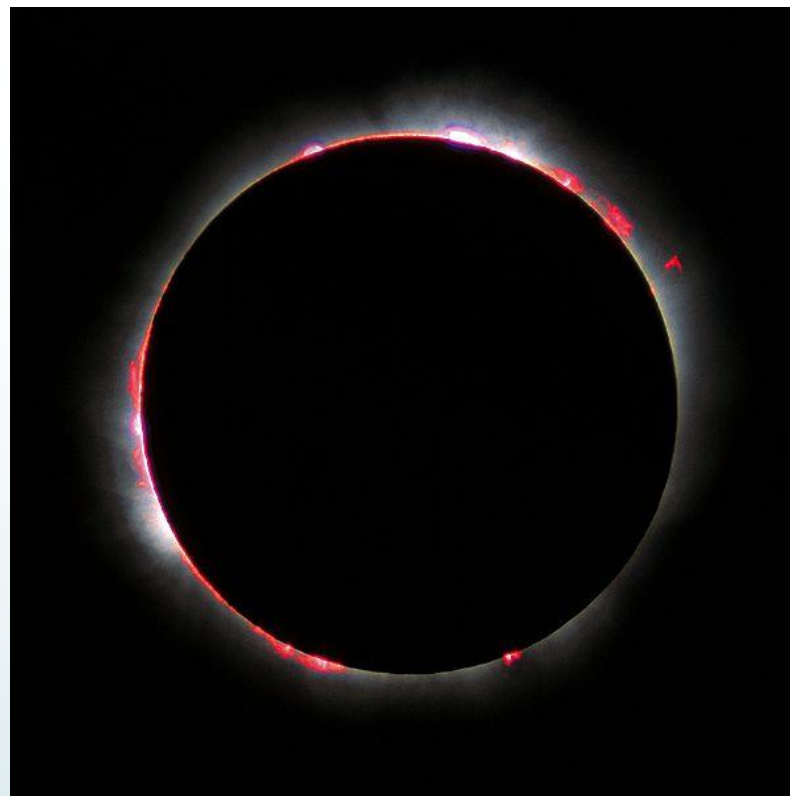
5-минутни осцилации

Слънчеви петна (отделна лекция)

Хромосфера

- „хромос“ от гр. – цвят
- 500–2100 (10000) km над фотосферата
- Температура: 4300–10000 K
- Flash spectrum: 4-8 sec

Хромосферен лимб –
по-тъмни и по-ярки места

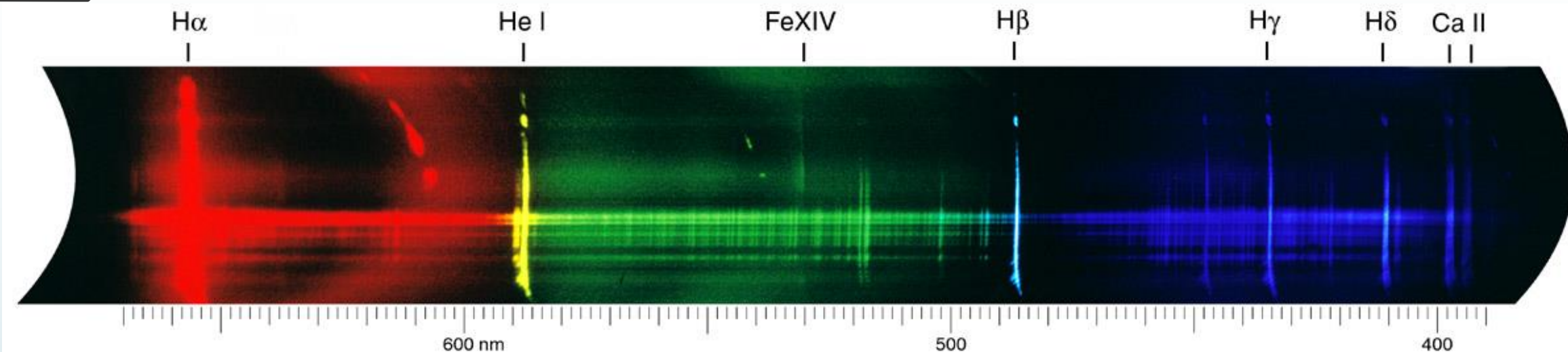


Над лимба: слънчево затъмнение 1999
www.lucnix.be



На диска:
<http://cesar.kso.ac.at/>

Хромосфера: flash spectrum



<http://www.eurastro.de/pictures/sofi99/mr/linspec.jpg>

Може да се наблюдава с тесни филтри в центъра на емисионни линии (доказателство за по-висока T там), напр.

балмеровата серия:

Ha (6563 Å) дава червения цвят, H β (4861 Å), H γ (4340 Å), H δ (4102 Å)

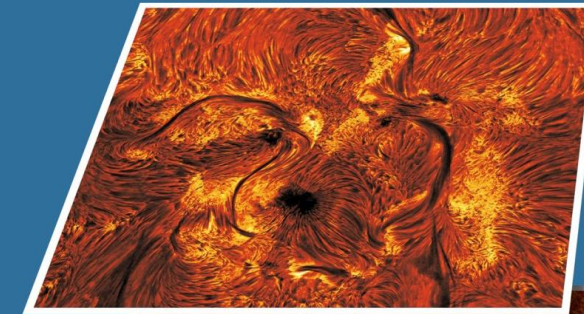
Ca II K (3934 Å)

Ca II H (3968 Å)

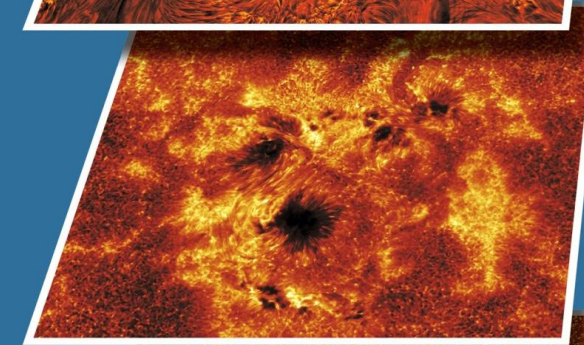
He (5876 Å) – хелия е открит за първи път в спектъра на Слънцето

Хромосфера

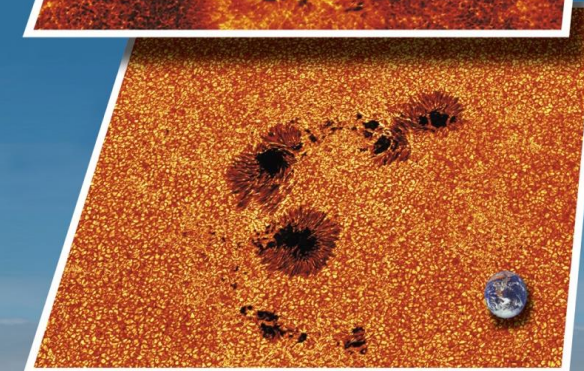
- <https://solarmonitor.org/>
- <https://www.nso.edu/>
- https://www.kso.ac.at/index_en.php
- <http://www.bbso.njit.edu/Research/FDHA/>



Ha, 656.3 nm
хромосфера
+2000 км



Ca II, 397 nm
ниска
хромосфера
+500 км



G-band, 430.5 nm
фотосфера 0 км

Dutch Open Telescope

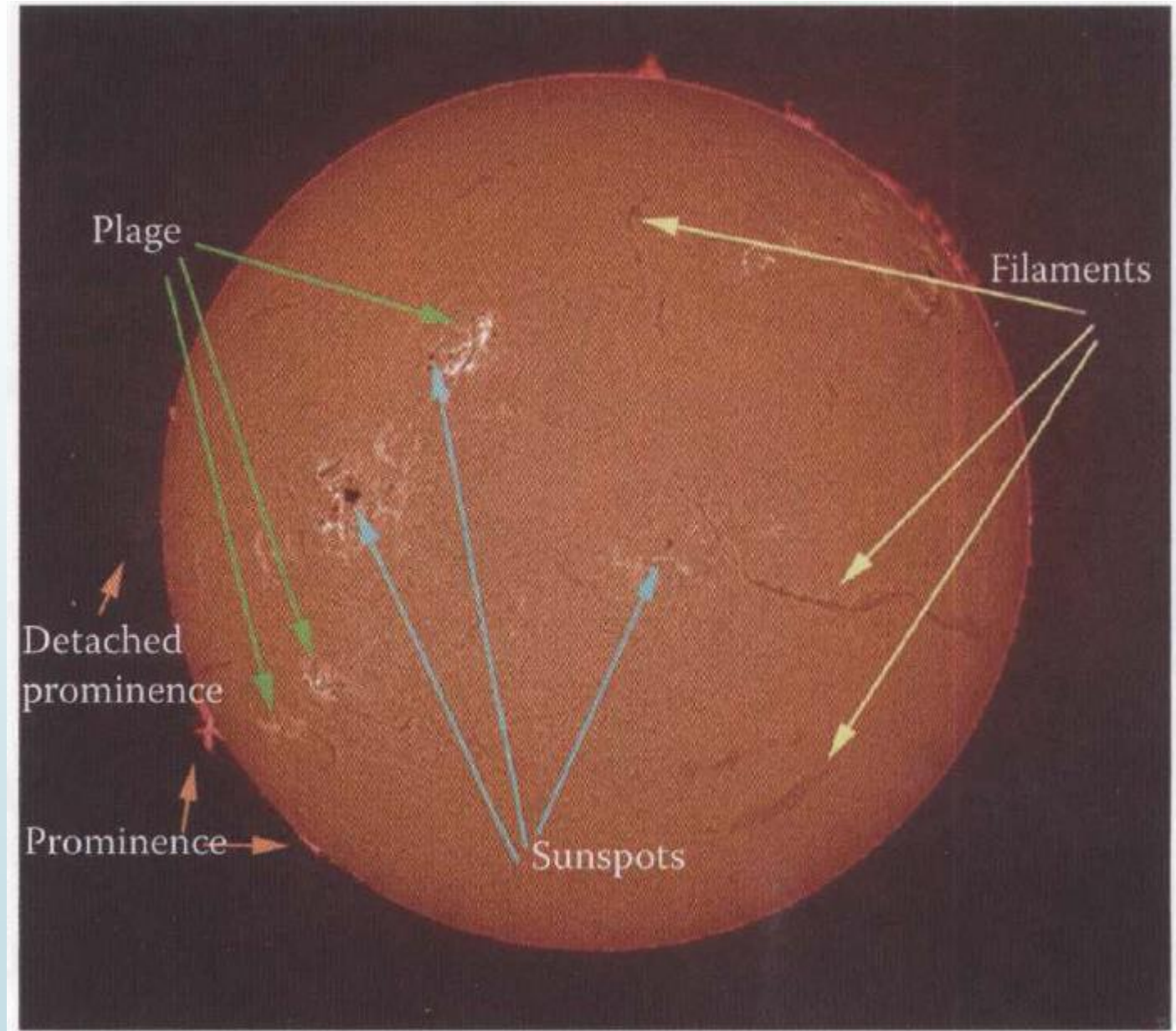
Ла Палма (Канарски
острови)

08-06-2005

<http://staff.science.uu.nl>



Хромосфера: структуры



Хромосфера: структури

Хромосферна мрежа

Ярки области в Ca II K

Място на силни вертикални магнитни полета

По-гореща плазма с низходящо движение

Времетраене – 28 часа

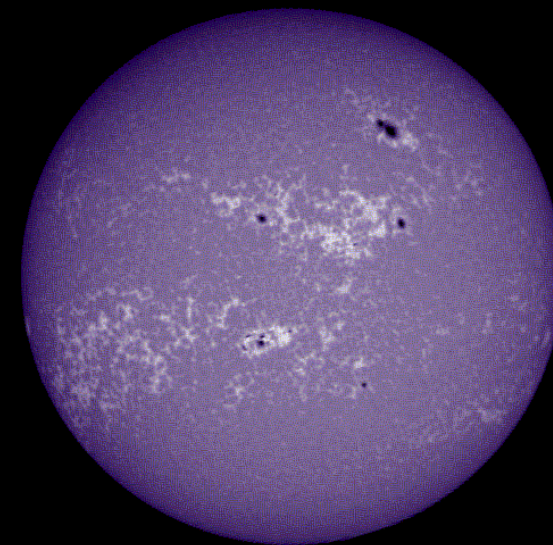
Очертава границата на свръхгранулите

“Plages” (от фр.)

Ярки области в H α , съвпадащи с местата на слънчевите петна и силно магнитно поле

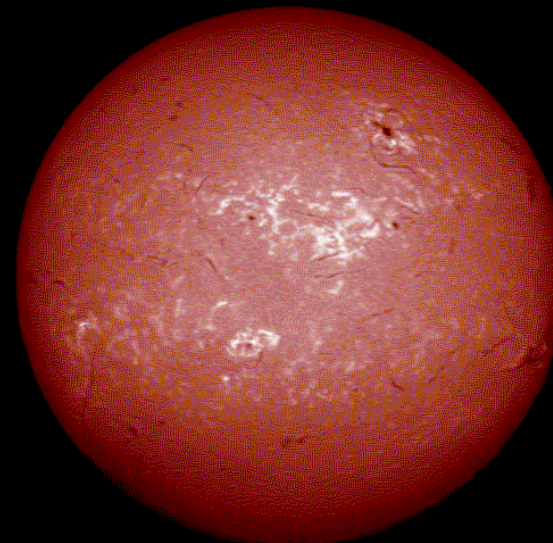
<https://solarscience.msfc.nasa.gov/feature2.shtml>

Ca II 3934 Å
BB50



1991 May 13

H I 6563 Å
BB50



1991 May 13

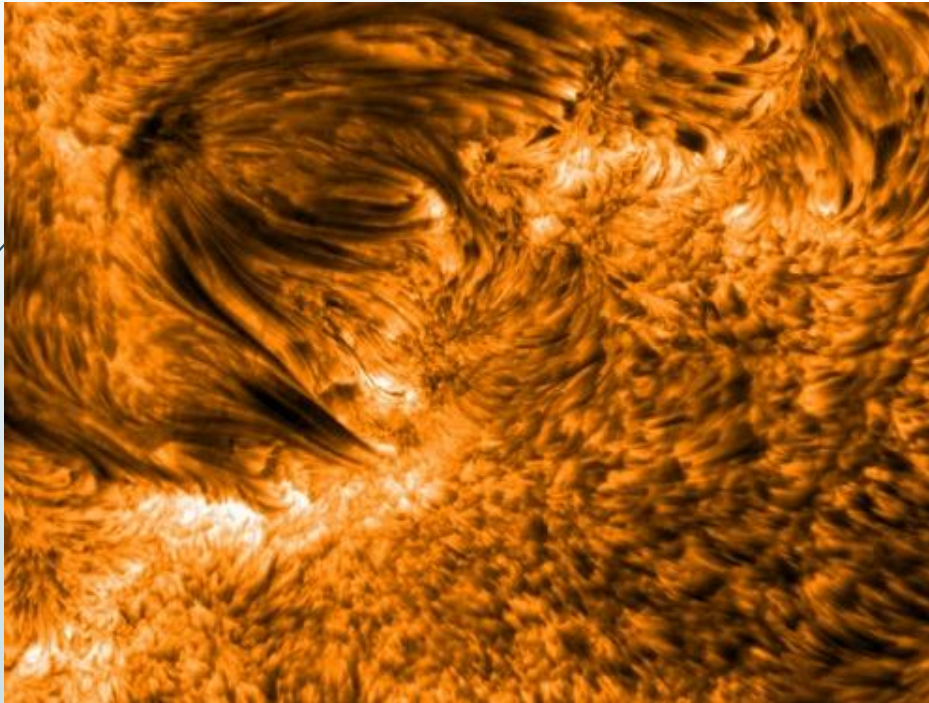
Хромосфера: Спикули

Solar astrophysics, Lectures 2005–2006
University of Central Lancashire

Spicules

Струи от плазма
Достигат до 1000-ди km
Времетраене: 5–10 min
Вертикален поток: 20–30 km/s

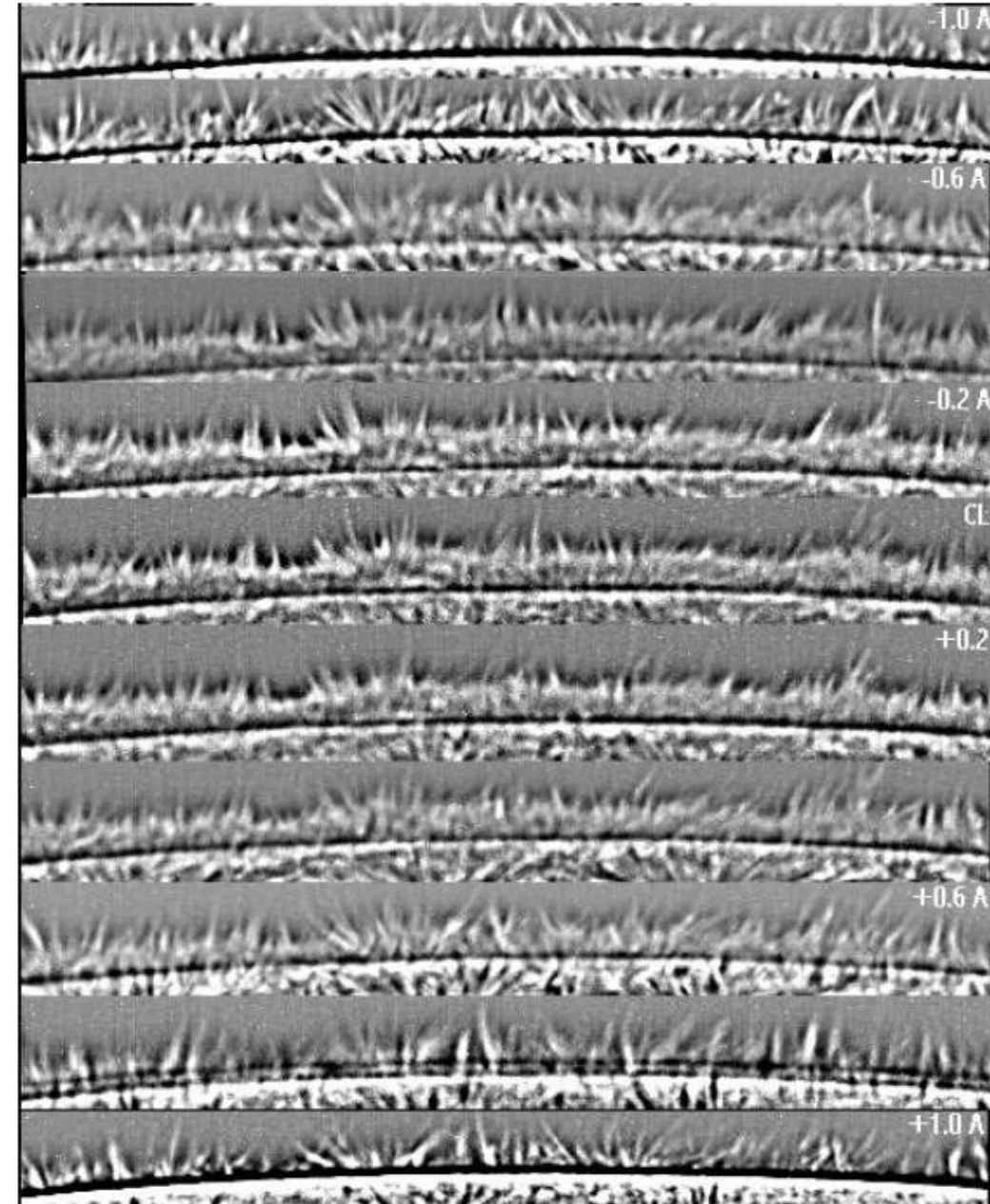
Figure 4.2 Spicules seen at the limb of the Sun in $H\alpha$ emission. Wavelength shifts away from the rest $H\alpha$ wavelength are indicated on the right hand side. Image Credits: NJIT/BBSO



<http://www.astronomy.com/news/2004/07/solar-spicules-explained>

Video:

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/scientists-uncover-origins-of-the-sun-s-swirling-spicules>



Хромосфера: Протуберанси

Protuberance/ Prominence (от фр.)

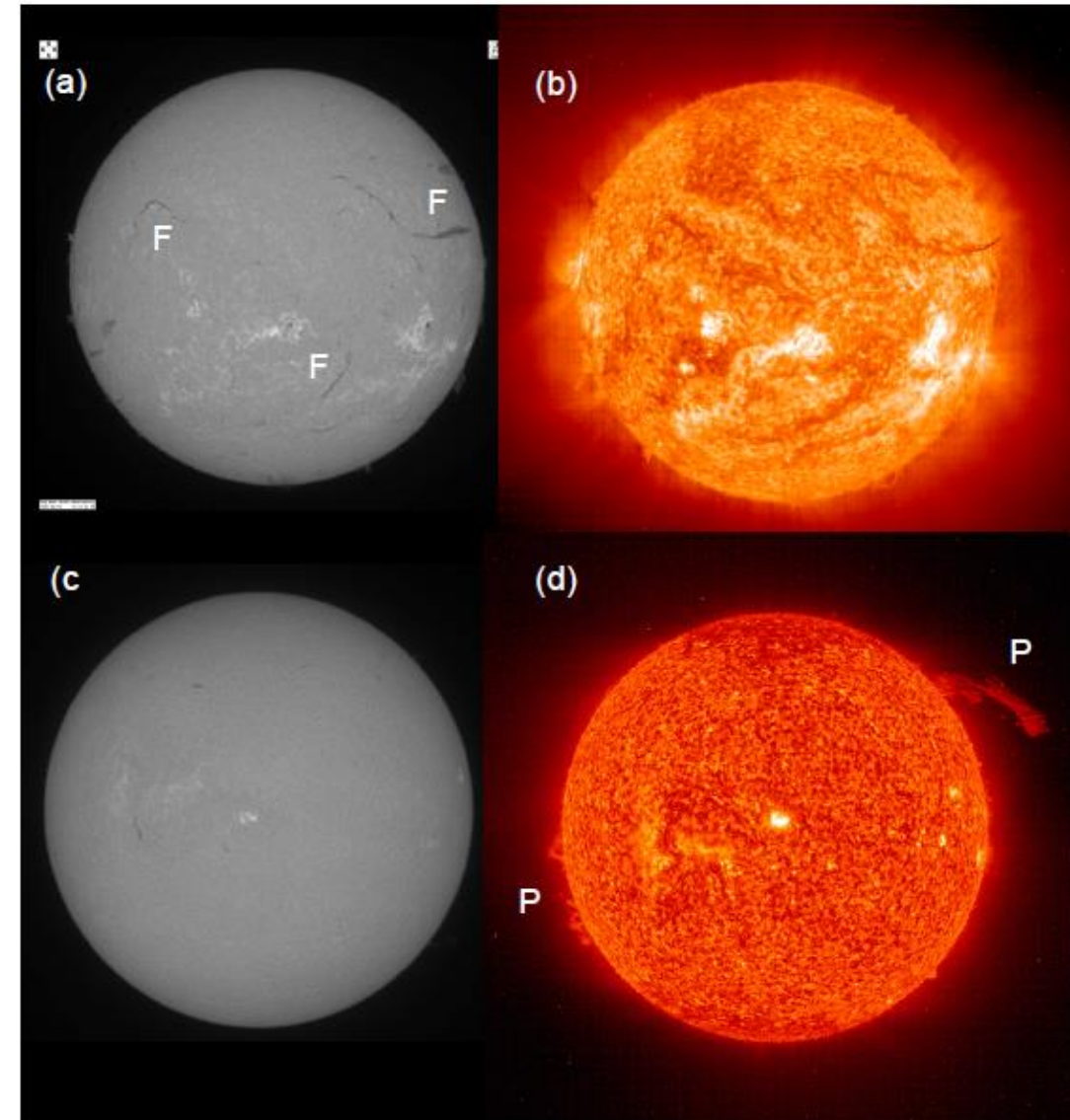
Ярки - над лимба

Filaments

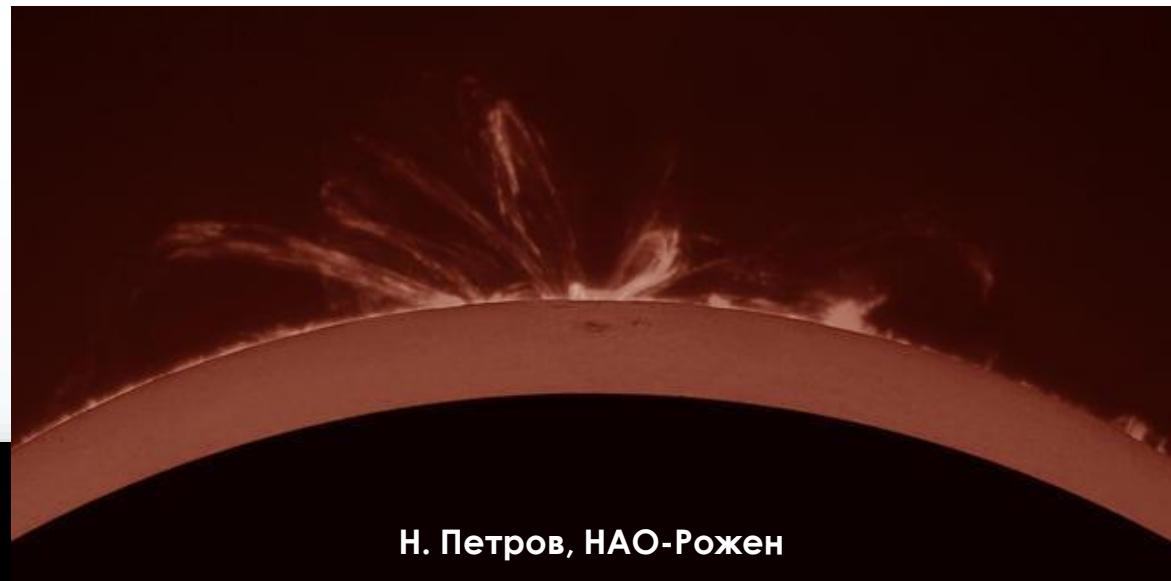
Тъмни - на диска

- По-хладни и по-плътни области от плазмени структури
- Тип: стабилни и еруптивни

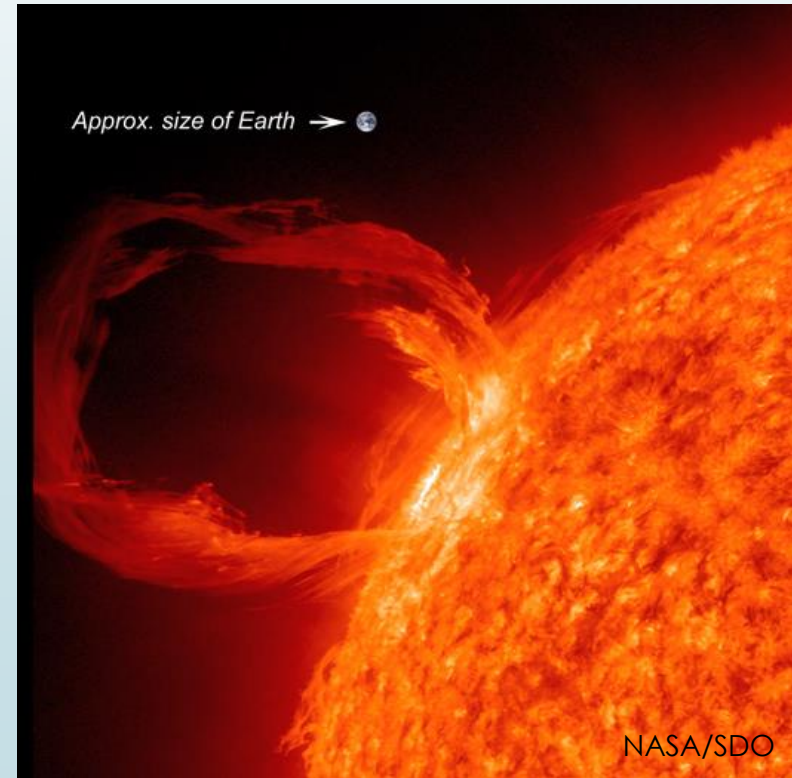
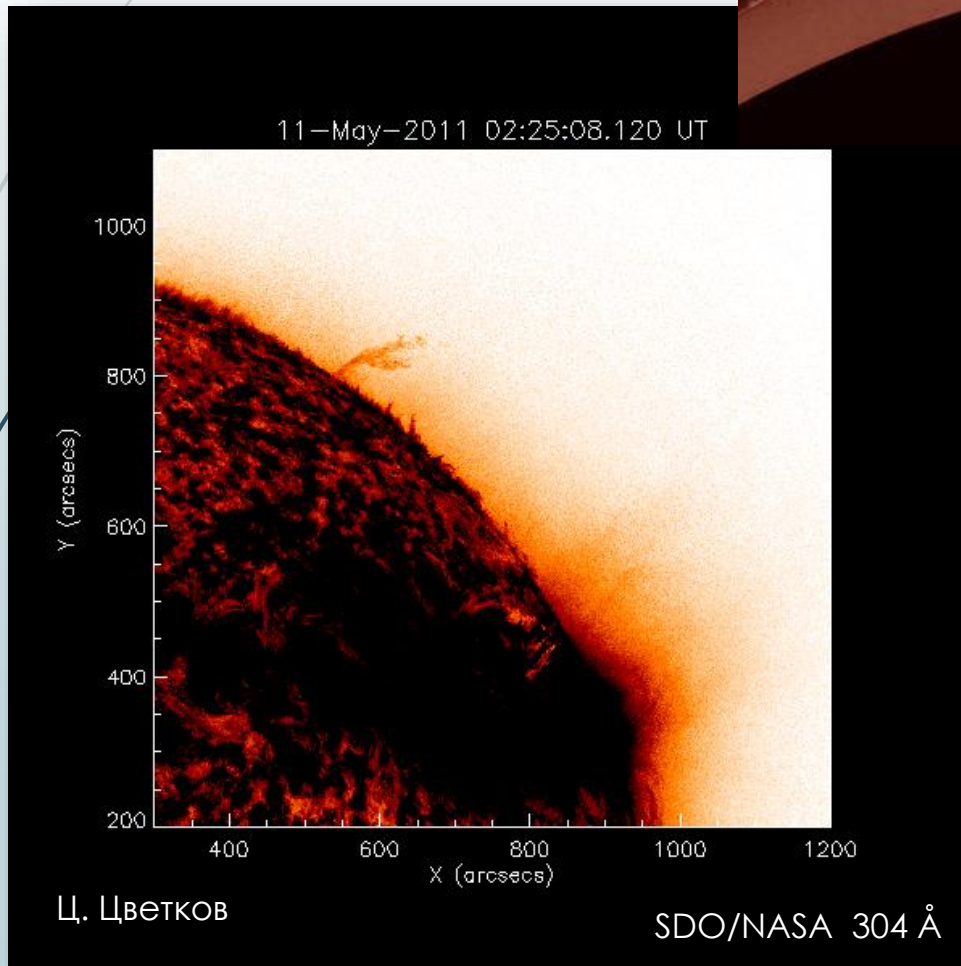
Figure 4.1
Prominences seen in $H\alpha$ and He II (chromospheric) emission at the limb (P) and on the solar disk as filaments (F).
Image Credits: NJIT/BBSO and SOHO/EIT.



Протуберанси



Н. Петров, НАО-Рожен



UV спектр на Слънцето: емисионни линии

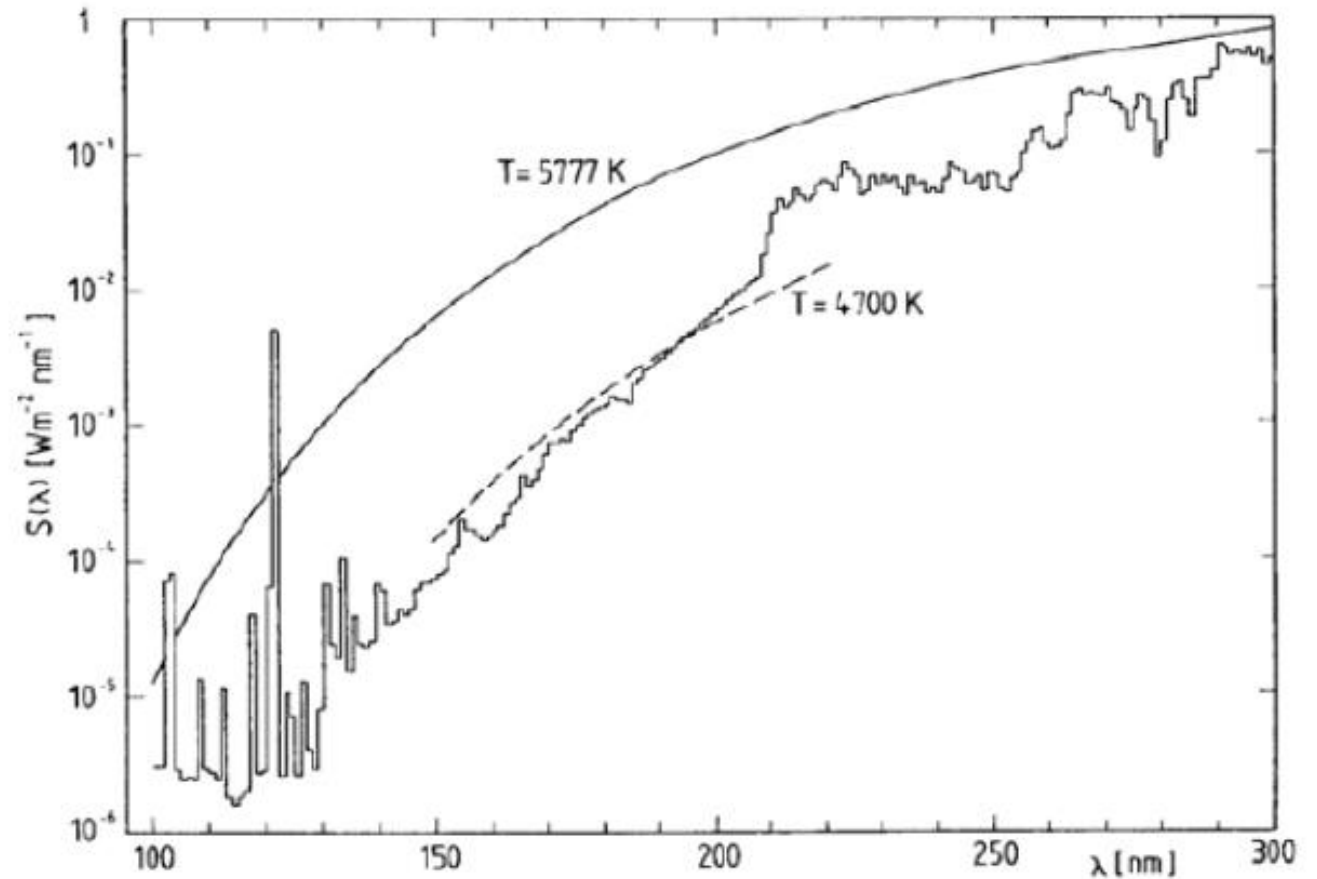
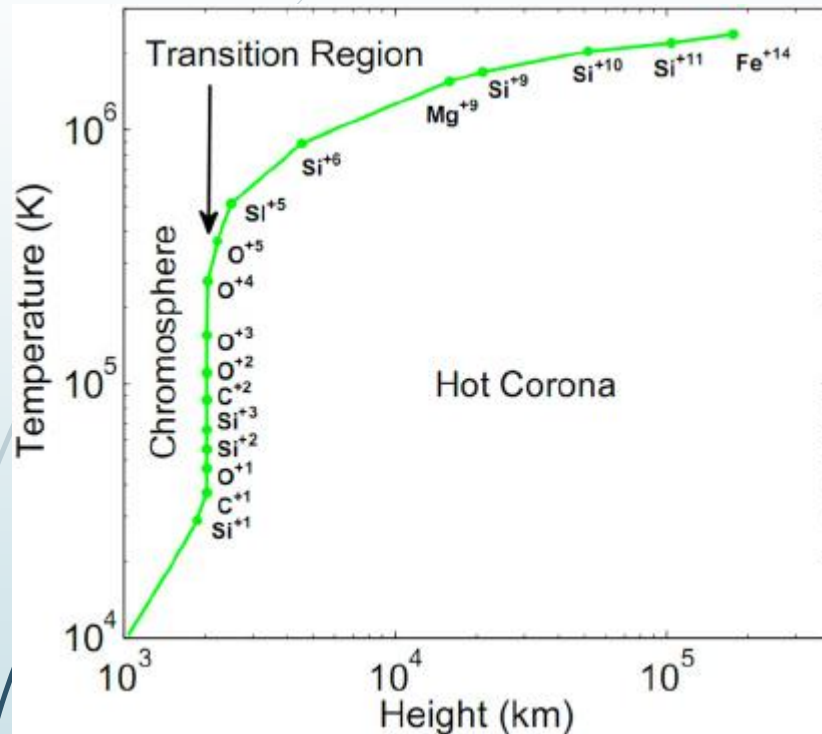
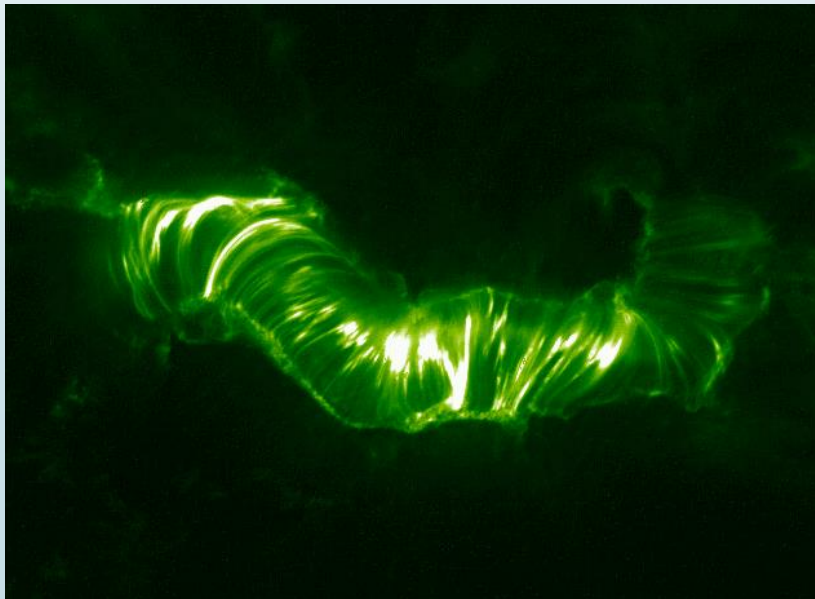


Figure 1.4: Solar UV spectrum down to 100 nm.

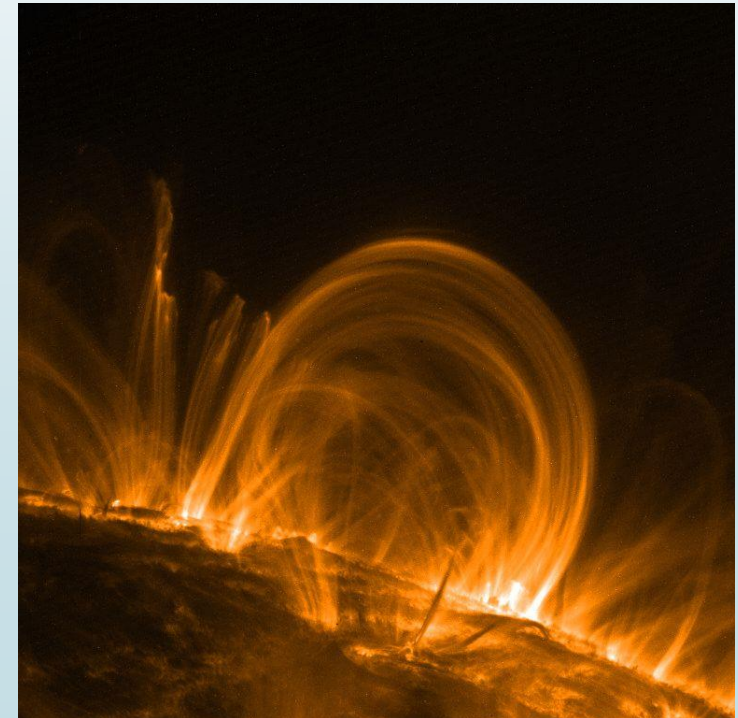
Преходен слой

- Наблюдение в емисионни линии
- TRACE mission
(Transition Region And Coronal Explorer)

<http://www.lmsal.com/TRACE/>



<https://apod.nasa.gov/apod/ap000928.html>



Корона – бяла светлина

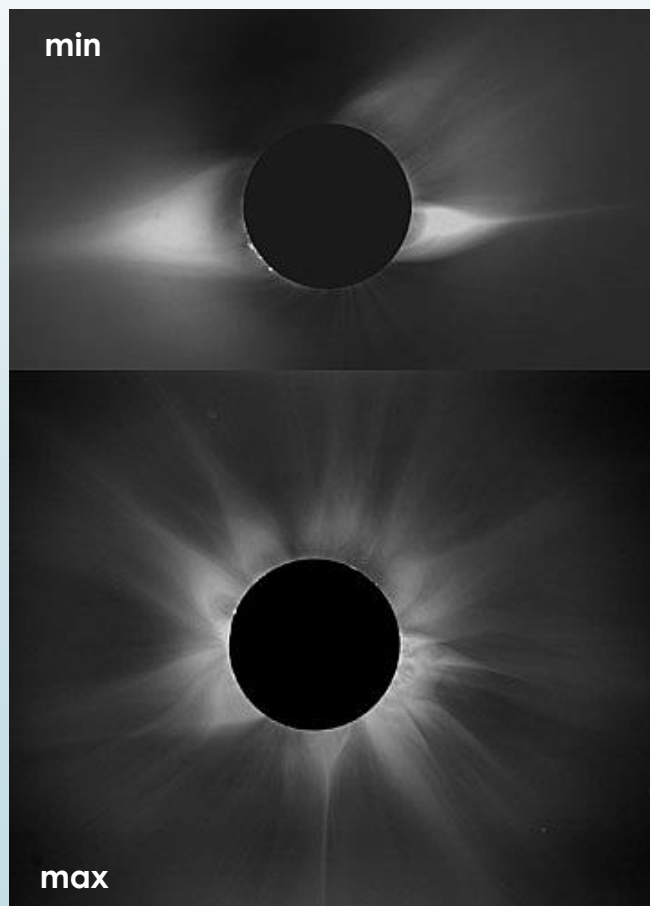
от лат. корона

Стримери

Хелмовидни структури – затворени, над области на активност

Коронални лъчи и коронални дупки

<https://scied.ucar.edu/sun-corona-solar-min-max>



<https://science.nasa.gov/total-solar-eclipse-corona-hdr>

Вида на короната зависи от фазата на слънчева активност

Корона – UV

► K (*kontinuierlich*)

Непрекъснат спектър, от разсейване на фотосферно излъчване от свободни електрони в короната

► F (*Fraunhofer*)

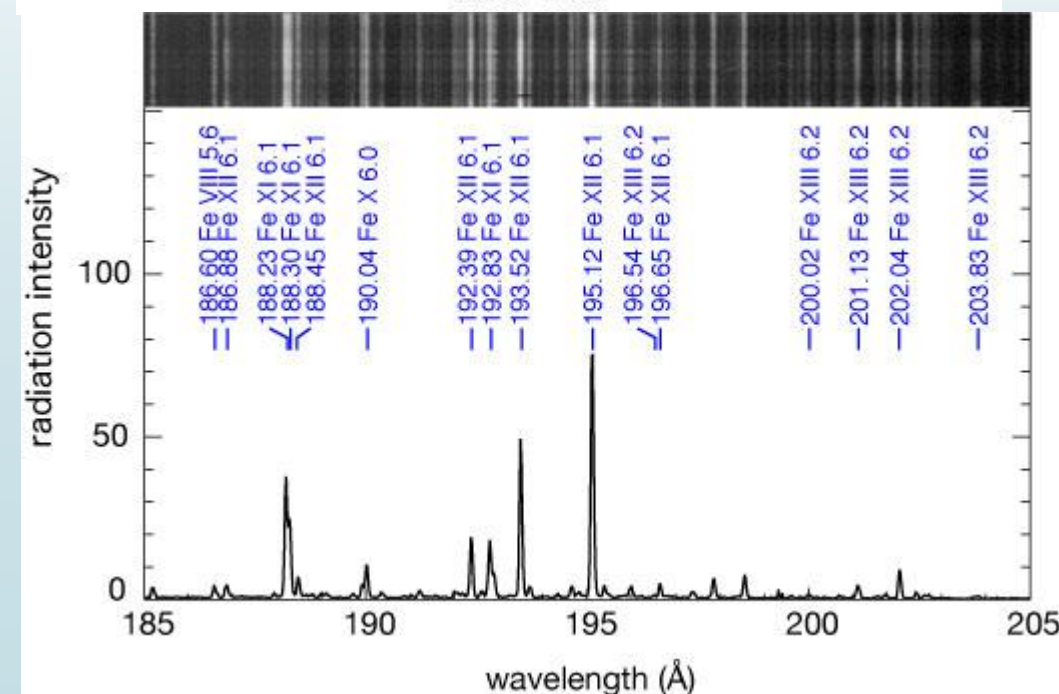
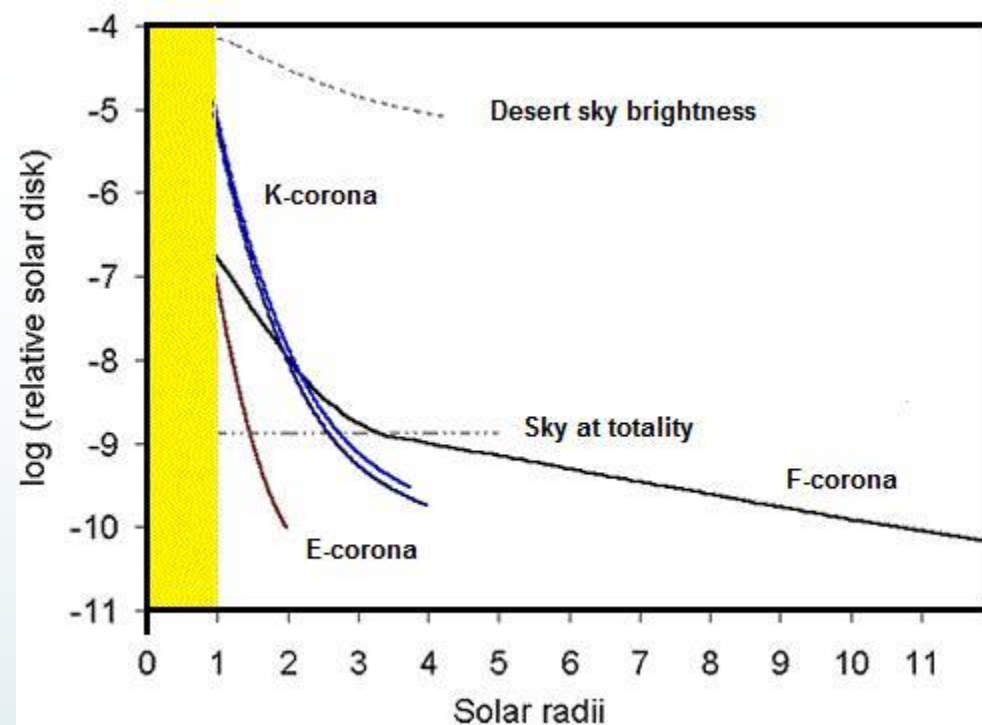
Разсейване на фотосферна светлина от прахови частици в равнината на еклиптиката (зодиакална светлина)

► E

Емисионни линии, излъчване от йони

Elden (1945) правилно определя емисионните линии от FeX, FeXIV (отпада хипотезата за т.нар. coronium): нужни са $T > 1\text{MK}$

Поляризация – до 50% – доказателство за разсейване от свободни електрони



Корона – X-rays

Арки/бримки

Активни области, показват част от магнитните силови линии

Коронални дупки

Плазма с по-ниска плътност

Soft X-rays

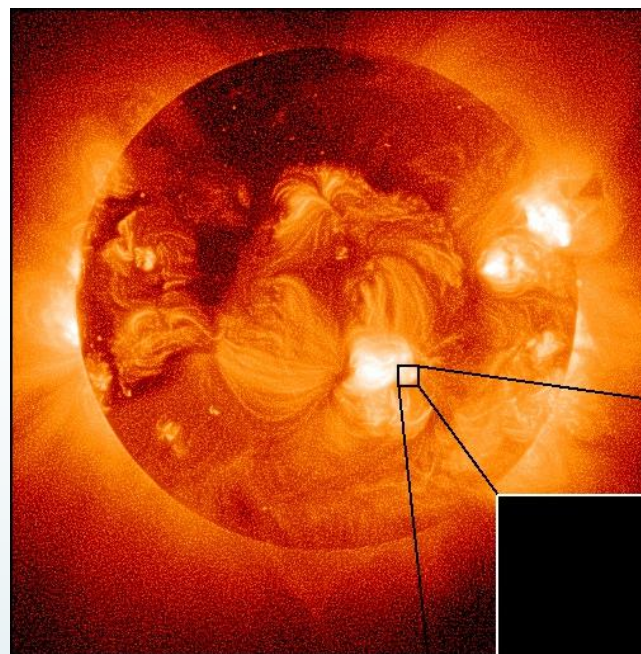
в Å, 1–2 МК

обширни области, арки, бримки

Hard X-rays

>20 MeV, >2 МК

Локализирани, в основата на магнитните бримки



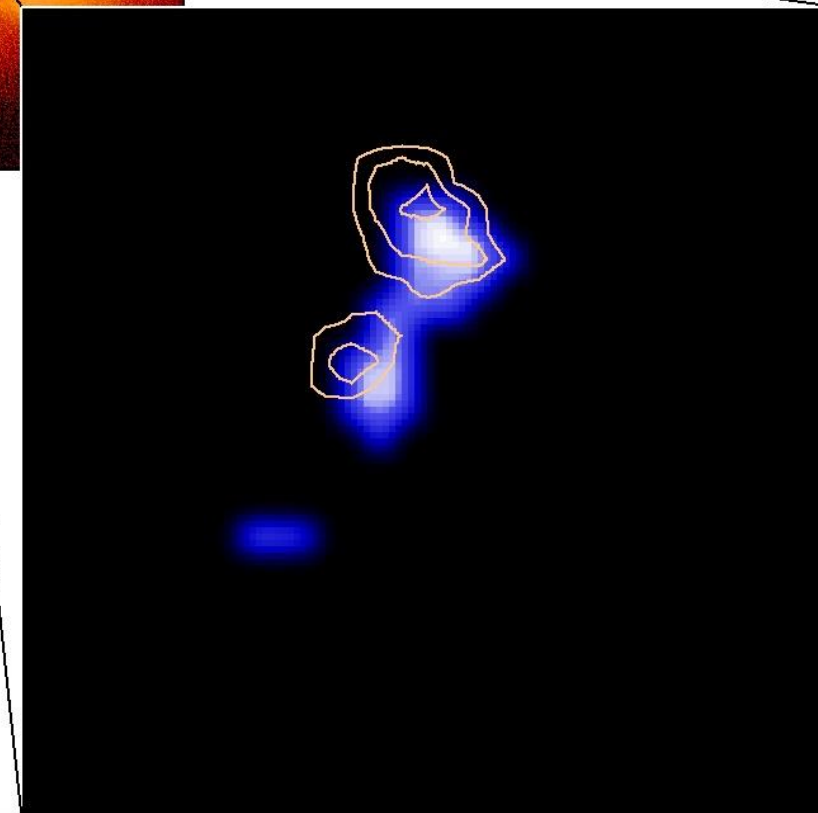
YOHKOH
Hard X-Ray Telescope

Hard X-ray Image
of a
White Light Flare

1991 November 15
22:38 U.T.

■ Hard X-ray Flare

□ White Light Flare

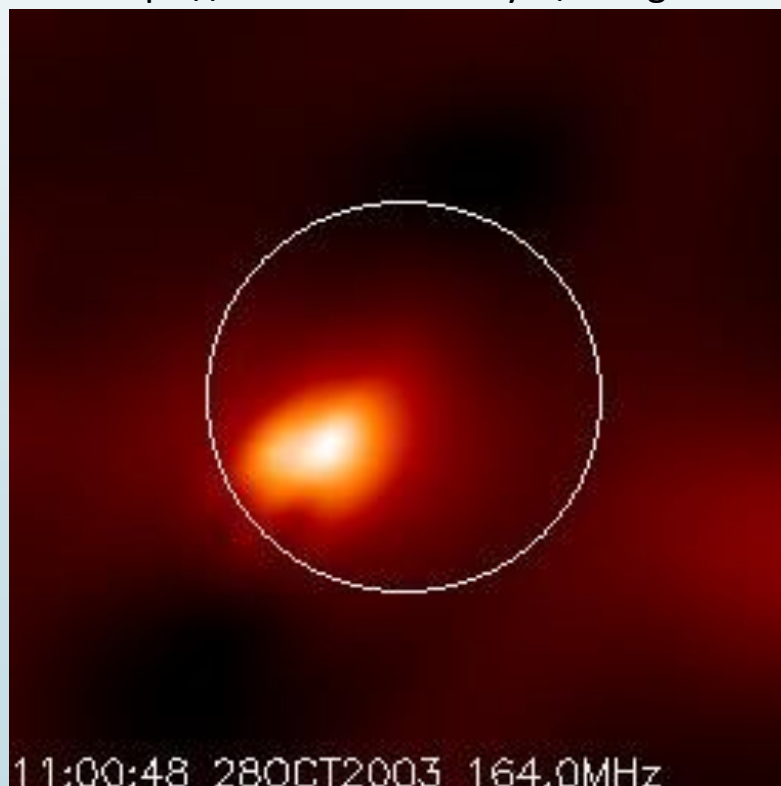


Радио диапазон

В зависимост от честотата (от GHz – излъчване в хромосфера до kHz – в междупланетната среда) радио наблюденията се използват за диагностика на различни структури и теоретични модели.

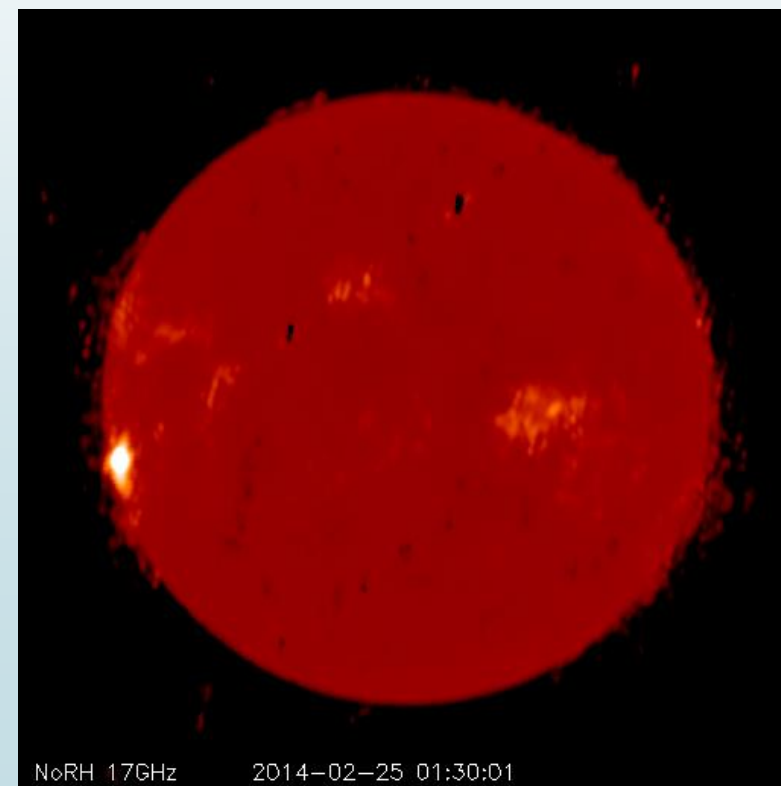
Nancay m radiohliograph

<https://www.obs-nancay.fr/?lang=en>



Nobeyama mm radio emission

<https://cdaw.gsfc.nasa.gov/>



Корона – (E)UV

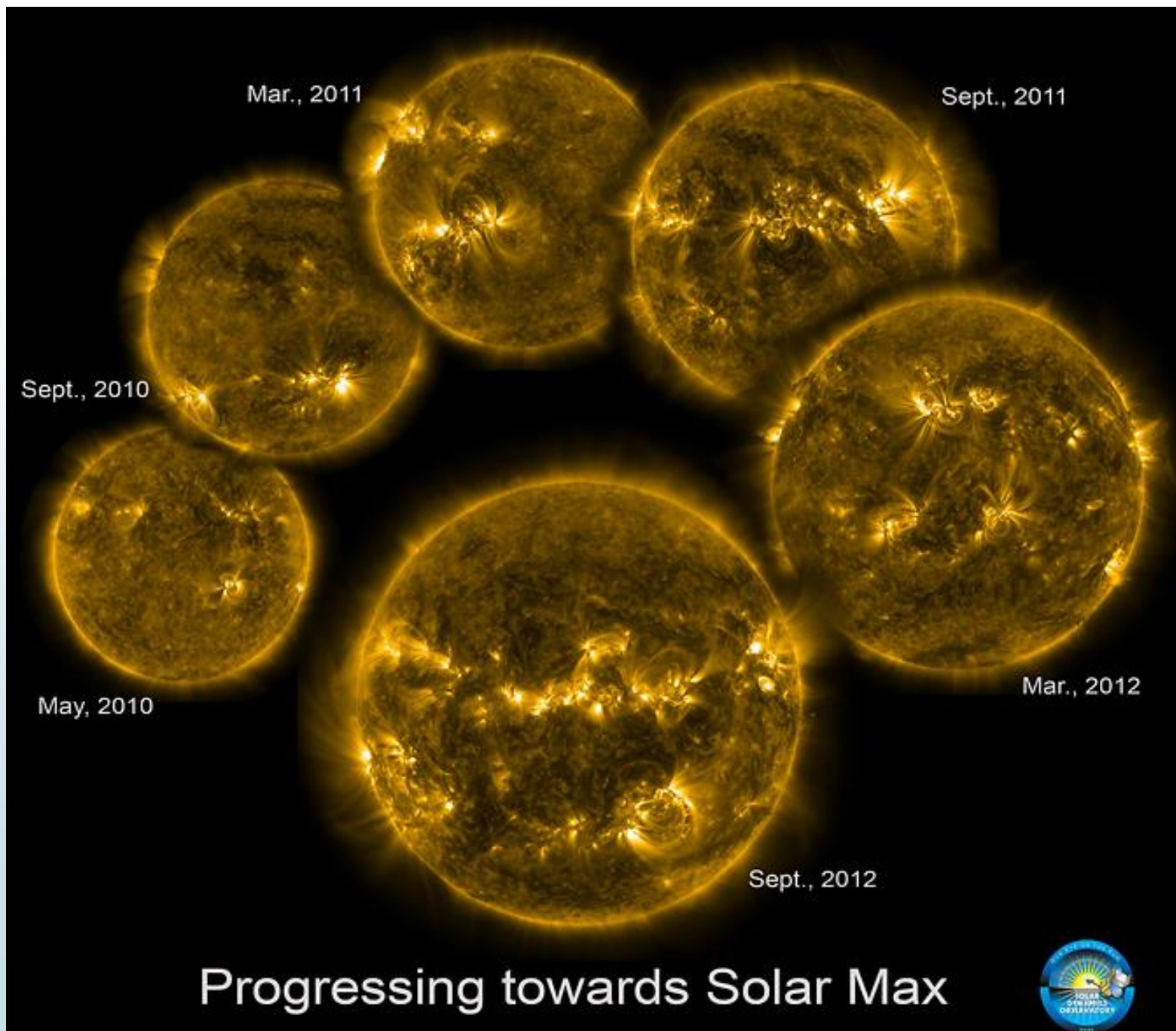
Арки/бримки

Магнитни силови линии

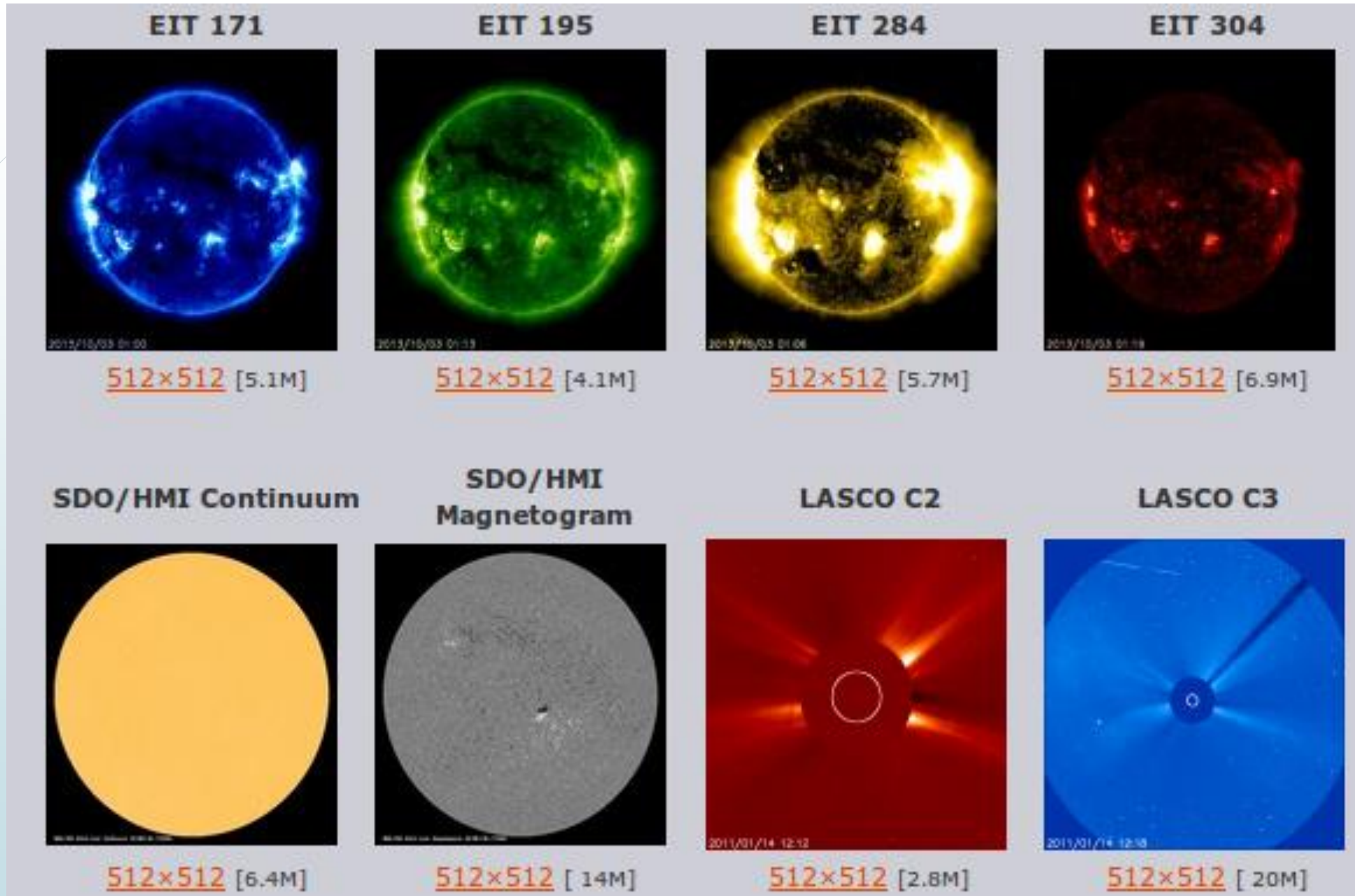
Коронални дупки

Плазма с по-ниска плътност

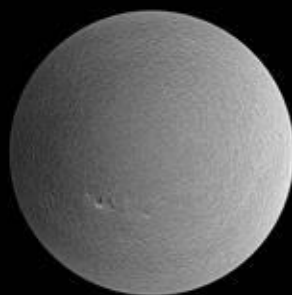
SDO 171 Å
<https://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/main/item/511>



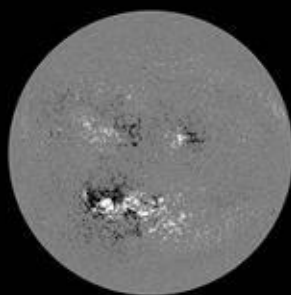
SOHO



Credit: SOHO
(ESA/NASA)



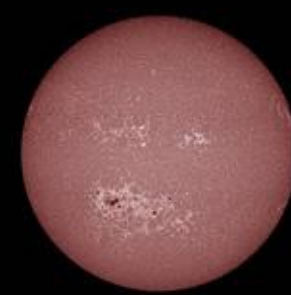
HMI Dopplergram
Surface movement
Photosphere



HMI Magnetogram
Magnetic field polarity
Photosphere



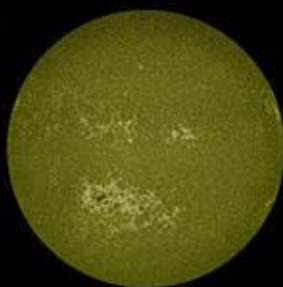
HMI Continuum
Matches visible light
Photosphere



AIA 1700 Å
4500 Kelvin
Photosphere



AIA 4500 Å
6000 Kelvin
Photosphere



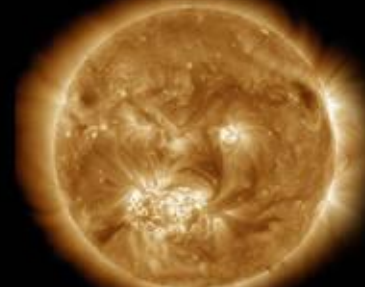
AIA 1600 Å
10,000 Kelvin
Upper photosphere/
Transition region



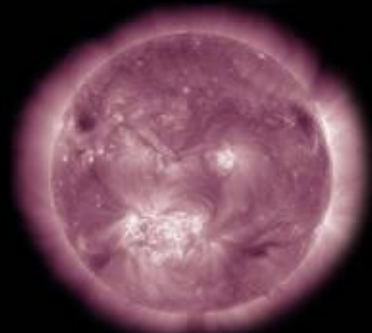
AIA 304 Å
50,000 Kelvin
Transition region/
Chromosphere



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



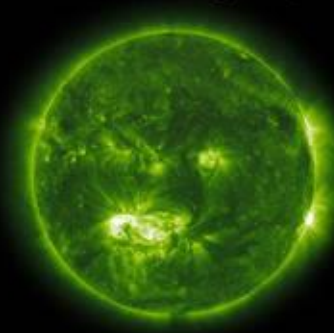
AIA 193 Å
1 million Kelvin
Corona/flare plasma



AIA 211 Å
2 million Kelvin
Active regions



AIA 335 Å
2.5 million Kelvin
Active regions



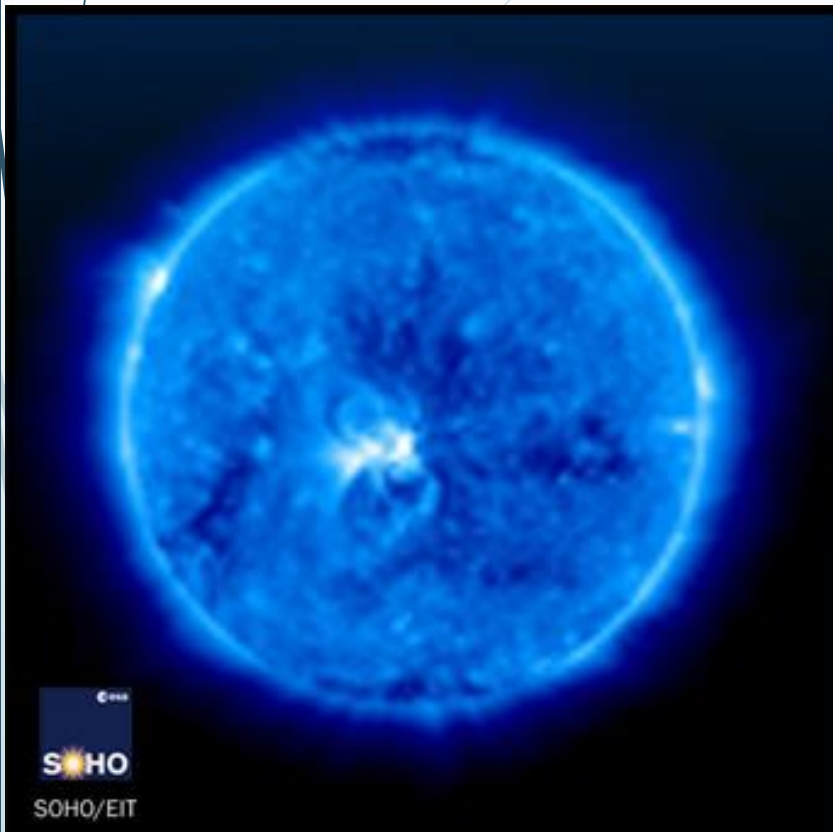
AIA 094 Å
6 million Kelvin
Flaring regions



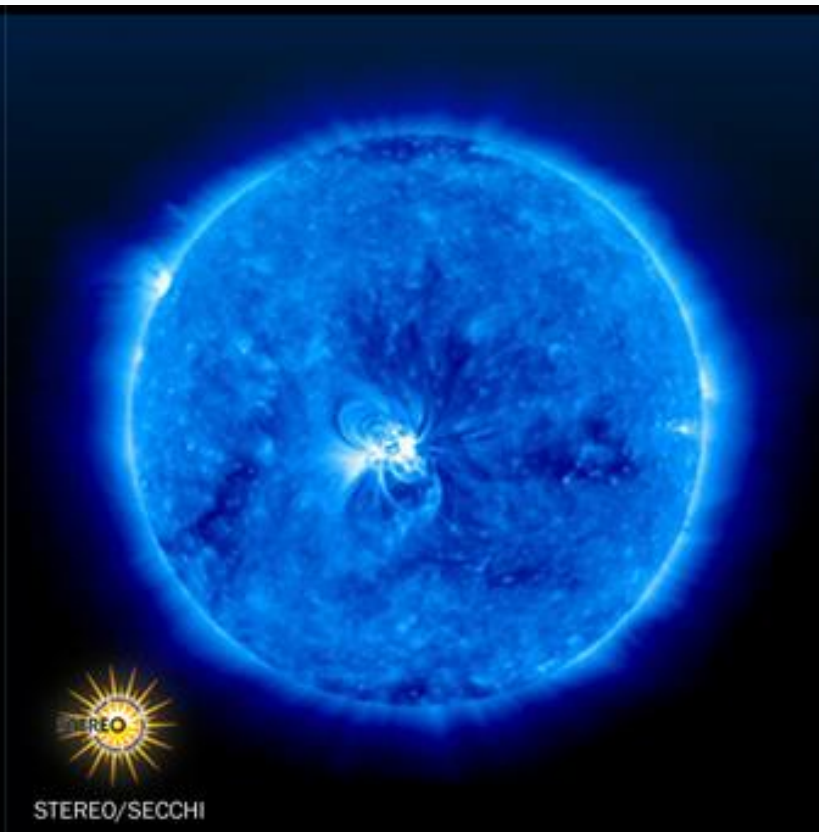
AIA 131 Å
10 million Kelvin
Flaring regions

Credit: SDO
(NASA)

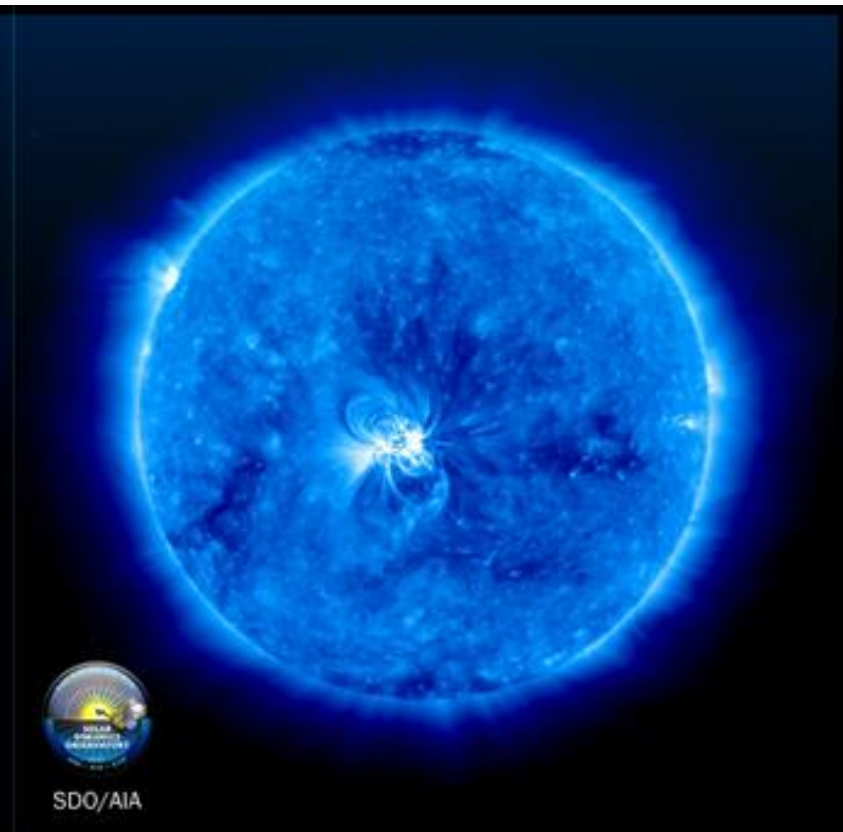
EIT/171 Å



SECCHI EUVI/171 Å



AIA/171 Å



<https://sdo.gsfc.nasa.gov/mission/instruments.php>

Hinode XRT and Yohkoh SXT Images at a Same Solar Activity Phase

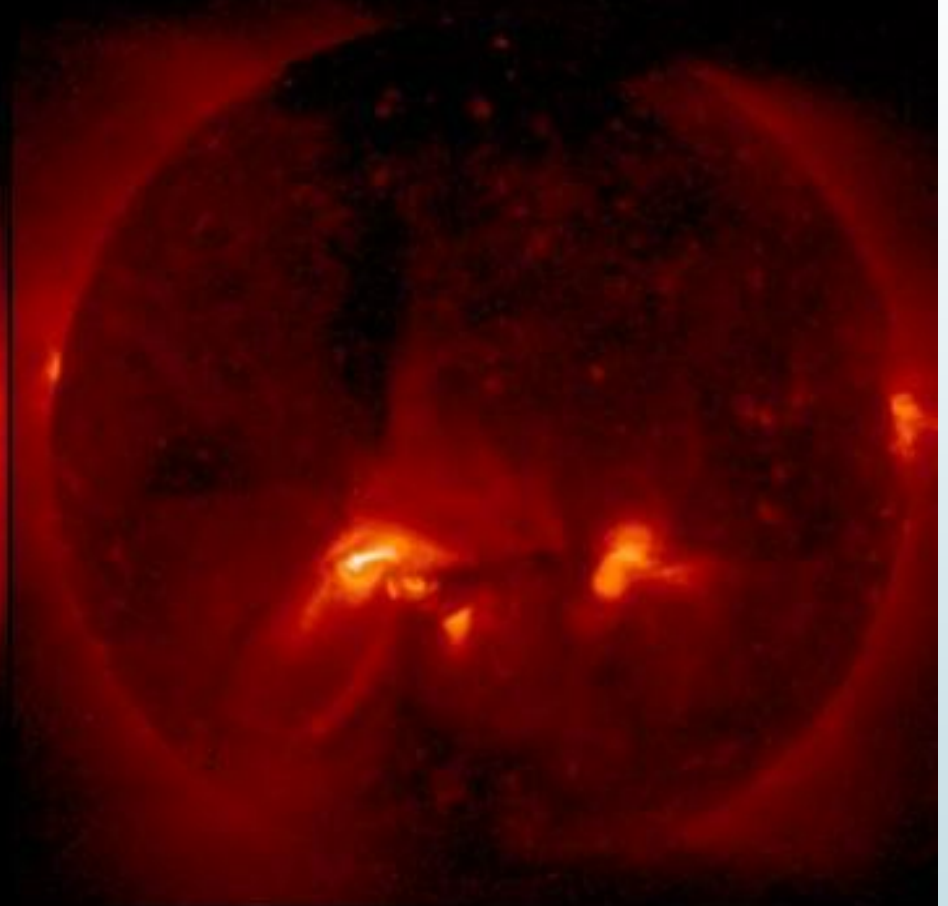
Spatial resolution 1 arcsec

5 arcsec



Hinode XRT

2007/12/08-10

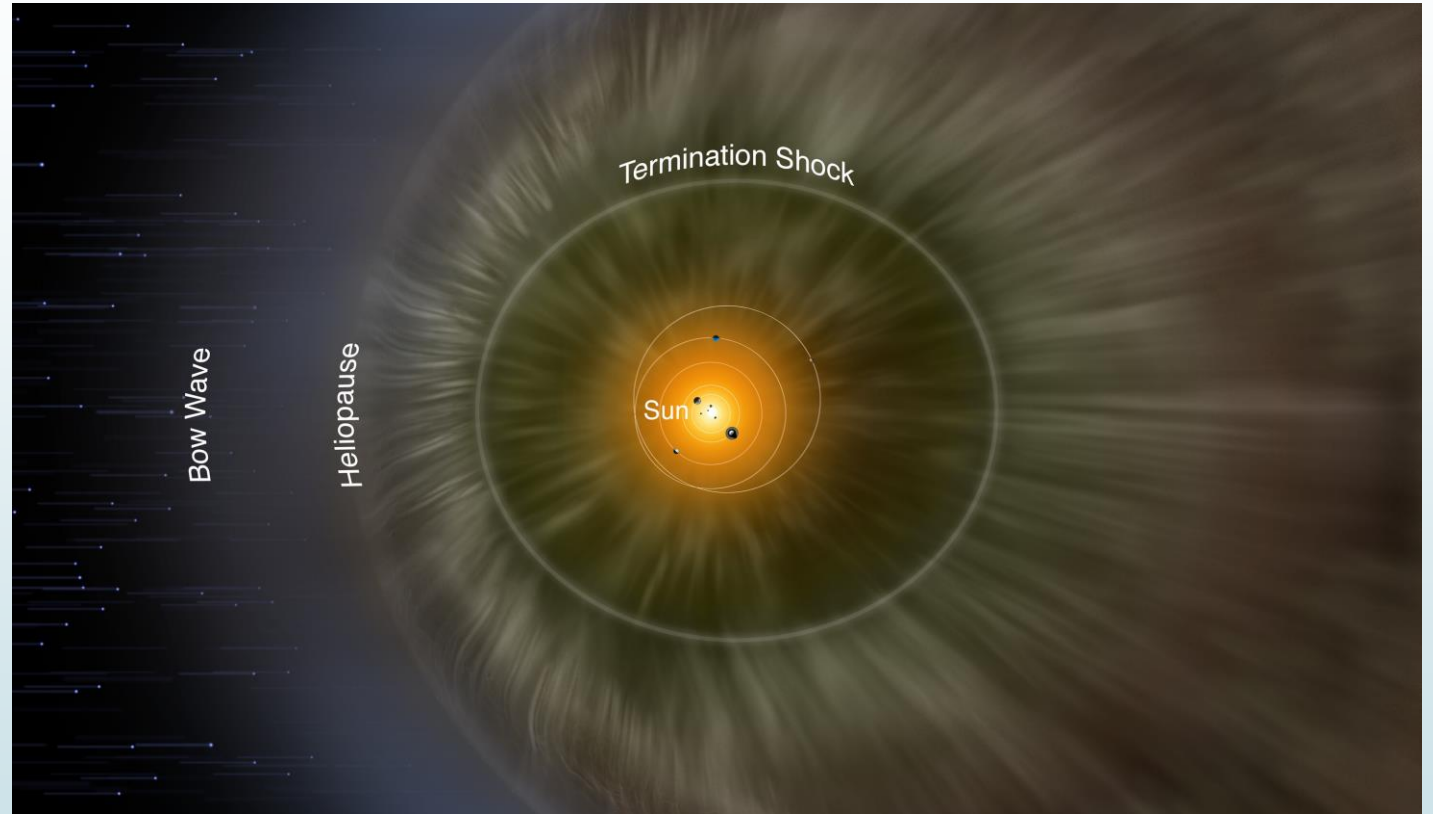


Yohkoh SXT

Hinode Workshop in China

Слънчев вятър (отделна лекция)

- Продължение на слънчевата корона в междупланетното пространство



<https://en.wikipedia.org/wiki/Heliosphere>