

فیزیک خورشید

خورشید به عنوان یک ستاره



۲۵ بهمن ۱۴۰۰

رضا رضایی
دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف
reza.rezaei@sharif.edu

چه چیز خورشید را یکتا می کند؟

نزدیک ترین ستاره به ماست

تنها ستاره ای که جو آن را با توان تفکیک بالا رصد می کنیم: هم تابش الکترومغناطیس، هم ذرات باردار

تنها ستاره ای که درون آن را با دقت رصد کرده ایم: لرزه شناسی خورشیدی، آشکارسازی نوترینو ها

برای حیات روی زمین اهمیت تام دارد

به دلیل توان تفکیک بالای رصد ها، آزمایشگاه فیزیک پلاسماست

پارامترهای خورشید

چگالی سطحی = $2 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^{-3}$

جرم = $1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$

چگالی متوسط = 1.4 g/cm^3

تابندگی = $3.84 \times 10^{26} \text{ W}$

دمای موثر = 5778 K (G2 V)

دمای هسته = $15 \times 10^6 \text{ K}$

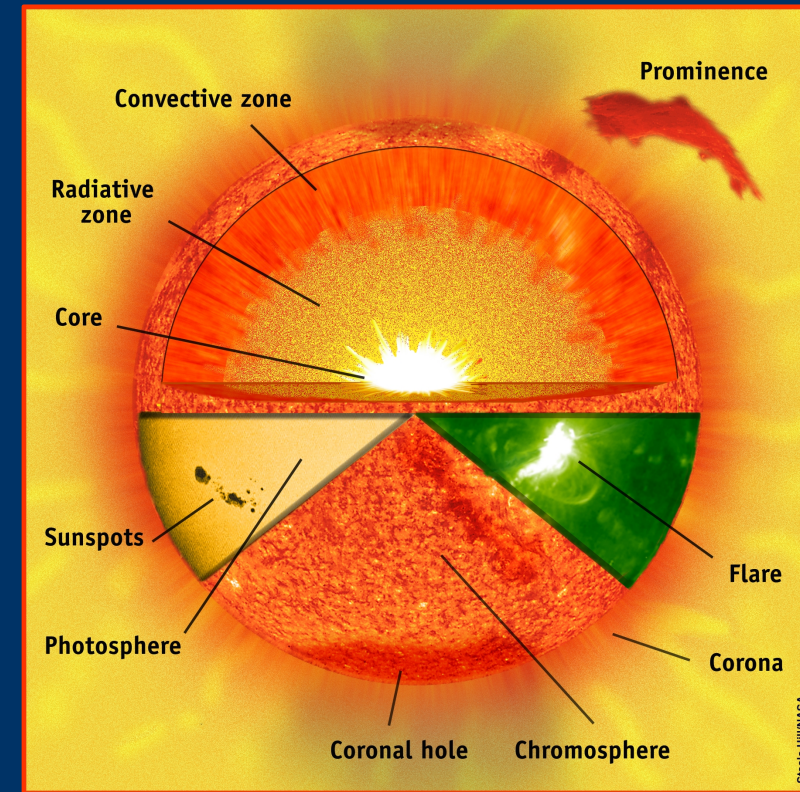
گرانش سطحی = 274 m/s^2

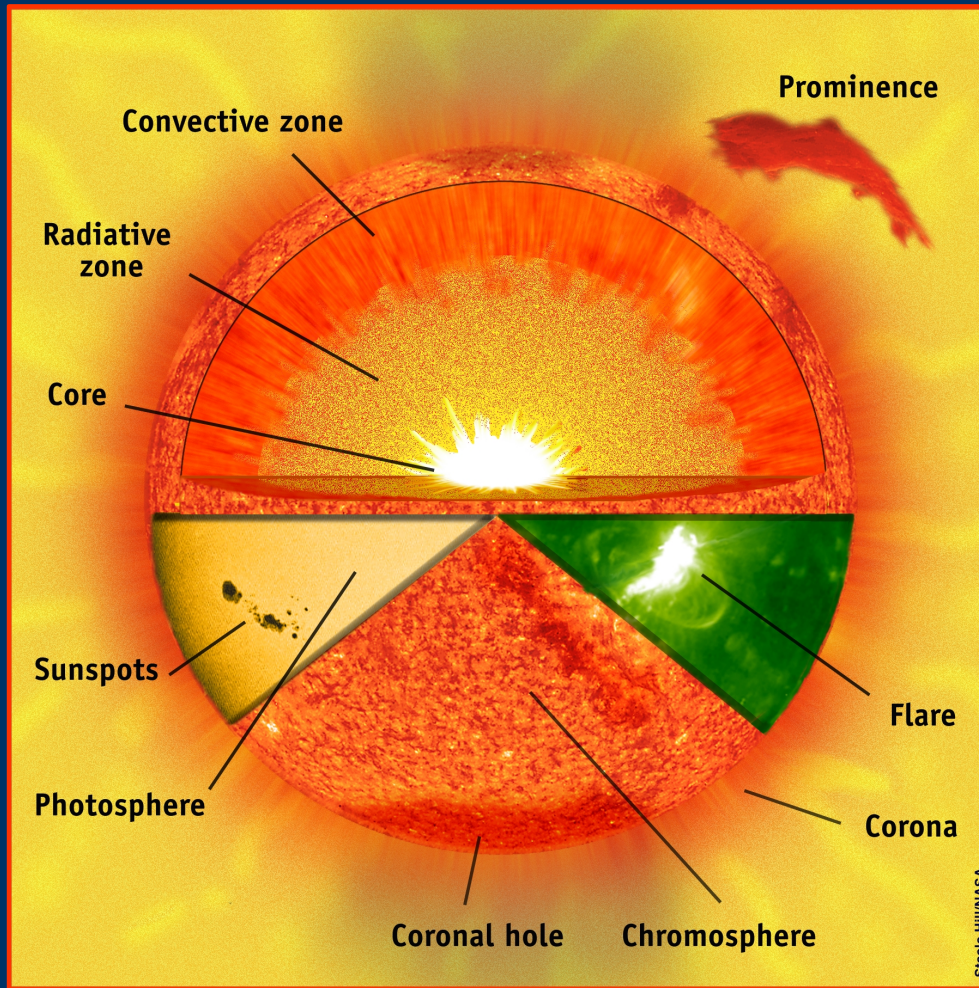
عمر = $4.55 \times 10^9 \text{ years}$

شعاع = $6.96 \times 10^5 \text{ km}$

فاصله = $1 \text{ AU} = 1.496 (+/-0.025) \times 10^8 \text{ km}$

دوره دوران = $27 \text{ days at equator}$





ترکیب شیمیایی

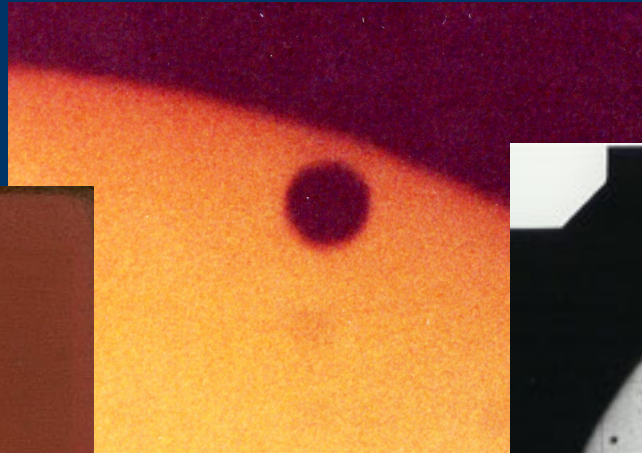
ترکیب شیمیایی سطحی 70% H, 28% He, 2% CNO

ترکیب شیمیایی مرکزی 35% H, 63% He, 2% CNO

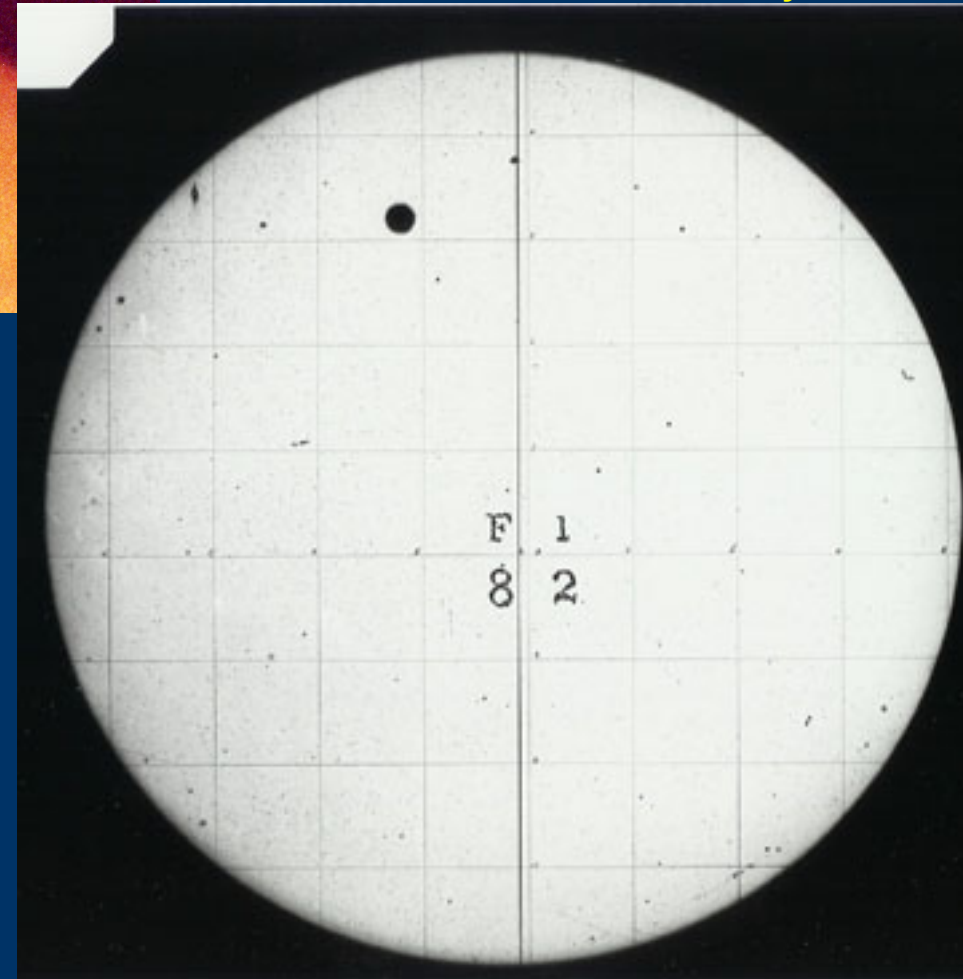
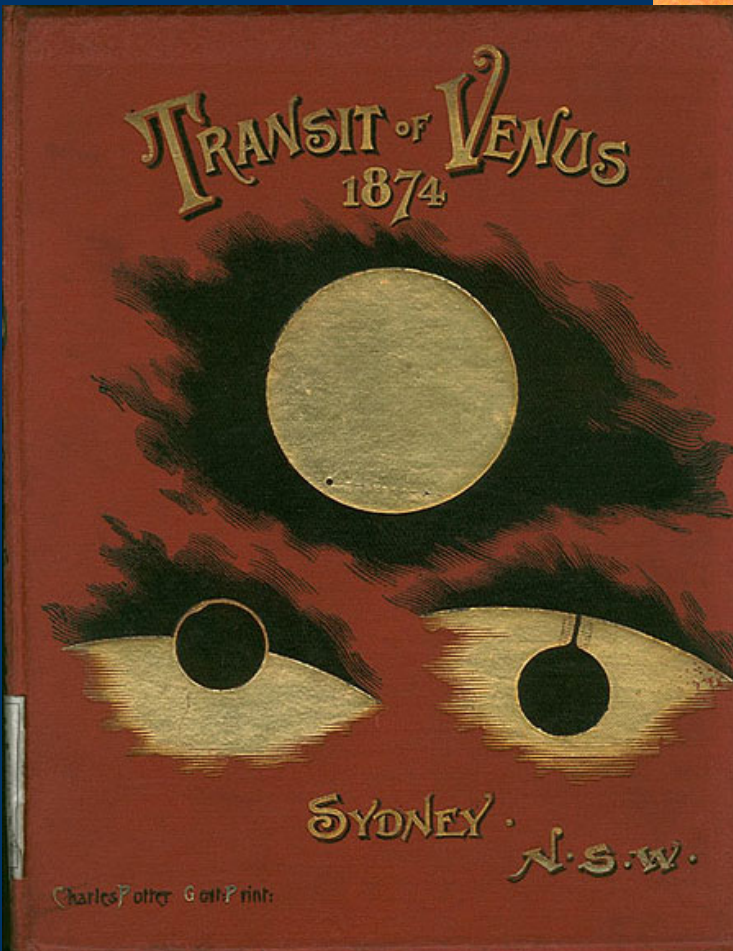
با کاهش تدریجی فراوانی هیدروژن، تابندگی خورشید افزایش میابد

فاصله

روش تاریخی؟ گذر زهره از روی قرص خورشید



US Naval Observatory, 1882



فاصله

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{Gm_{\odot}}{4\pi^2} \left(1 + \frac{m}{m_{\odot}}\right)$$

قانون سوم کپلر

$$\left(\frac{a_1}{a_2}\right)^3 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 \frac{1 + m_1/m_{\odot}}{1 + m_2/m_{\odot}}$$

نسبت نیم قطر بزرگ دو جسم

با دانستن یک فاصله، بقیه به دست می آید

از سال ۱۹۶۱ فاصله تا زهره و سیارک ها با رادار اندازه گیری شده است
واحد نجومی بر مبنای زمان پرواز فوتون از خورشید به زمین محاسبه شده
است

$$t = 499.0047 \text{ s}$$

$$\text{Astronomical unit (AU)} = 149597870 \pm 2 \text{ km}$$

1 arcsec \approx 725 km on the solar surface

فاصله

از سال ۱۹۶۱ فاصله تا زهره و سیارک ها با رادار اندازه گیری شده است
واحد نجومی بر مبنای زمان پرواز فوتون از خورشید به زمین محاسبه شده
است $t = 499.0047 \text{ s}$

$$\text{Astronomical unit (AU)} = 149597870 \pm 2 \text{ km}$$

اگر از تعریف سال نجومی استفاده کنیم و جرم سیستم ماه-زمین را در نظر بگیریم، نیم
قطر اصلی مدار قدری بزرگتر خواهد بود

$$a = 1.000000036 \text{ AU}$$

بازه تغییرات فاصله زمین تا خورشید $1.471 - 1.521 \times 10^8 \text{ km}$

$$1 \text{ arcsec} = 710-734 \text{ km on solar surface}$$

جرم

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{Gm_{\odot}}{4\pi^2} \left(1 + \frac{m}{m_{\odot}} \right)$$

قانون سوم کپلر

از این راه حاصل ضرب Gm_{\odot} به دست می آید

$$Gm = (132712438 \pm 5) \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{s}^2$$

دقت اندازه گیری ثابت گرانش محدود است و این عامل اصلی عدم قطعیت جرم خورشید است

$$\text{Solar mass} = 1.9889 \pm 0.0003 \times 10^{30} \text{ kg}$$

آهنگ کاهش جرم = هیدروژن سوزی + باد خورشیدی

$$\text{mass loss} \approx (4 + 1) \times 10^9 \text{ kg/s}$$

$$\text{Lifetime} \approx 1.5 \times 10^{17} \text{ s}$$

$$\text{Total mass loss} \approx 10^{27} \text{ kg}$$

تمرین: محاسبه زمان سقوط آزاد خورشید

$$dr^2/dt^2 = - Gm/r$$

مقیاس های زمانی خورشید

nuclear timescale >> thermal timescale >> free-fall timescale

مقیاس های زمانی خورشید

dynamical timescale² $\sim 1/ (G \langle\rho\rangle)$

thermal = total thermal energy / luminosity

nuclear = total nuclear energy / luminosity

nuclear timescale \gg thermal timescale \gg free-fall timescale

خورشید جوان نسبت به خورشید امروزی

باد؟

دوران؟

میدان مغناطیسی؟

تابندگی؟

دمای مرکزی؟

خورشید پیر نسبت به خورشید امروزی

باد؟

دوران؟

میدان مغناطیسی؟

تابندگی؟

دمای مرکزی؟

شعاع

با استفاده از اندازه زاویه ای و فاصله معلوم
با استفاده از سرعت سوق با تلسکوپ ثابت و زمان عبور از یک قطر
لبه خورشید دقیقا کجاست؟
اندازه گیری ها تفاوت معنی داری با هم دارند
دید نجومی کار را دشوار می کند (فصل سه)
شعاع اندازه گیری شده تابع طول موج است

$$\text{Solar radius} = 6.960 \pm 0.001 \times 10^8 \text{ m}$$

$$\text{surface gravity} \approx 274 \text{ m/s}^2$$

$$\text{mean density} \approx 1.4 \text{ g/cm}^3$$

شعاع: لبه خورشید دقیقا کجاست؟

عمق نوری در لبه برابر چهار هزارم است. در مقابل در مدل های نیمه تجربی، مقدار شعاع ستاره برابر مکانی است که در آن عمق نوری برابر دو سوم باشد. در این نقطه دمای ترمودینامیکی برابر دمای موثر است. اختلاف این دو تعریف حدود سیصد کیلومتر است

$$\text{Solar radius (tau=2/3)} = 6.957 \pm 0.001 \times 10^8 \text{ m}$$

$$dr/dt \approx 2.4 \text{ cm/yr}$$

آهنگ تغییر شعاع خورشید

Luminosity

تابندگی

مجموع فوتونهای تابیده شده در تمام طول موج ها در واحد زمان

Total solar irradiance

روی زمین ثابت خورشیدی را اندازه گیری می کنیم

به علت جذب در جو زمین، ثابت خورشیدی باید از فضا یا ارتفاع بلند اندازه گیری شود

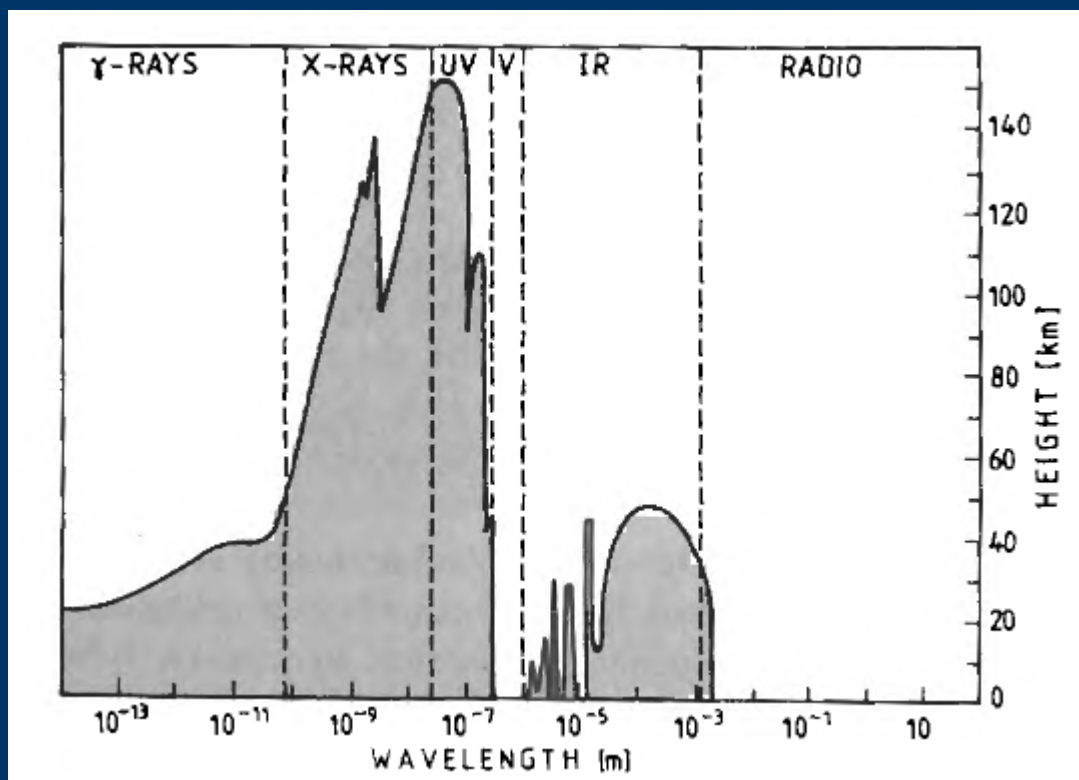
$$\text{Luminosity} = 3.844 \pm 0.010 \times 10^{26} \text{ W}$$

$$\text{TSI} \sim 1367 \pm 3 \text{ W/m}^2$$

تابندگی و دمای موثر

تابندگی خورشید اولیه ۷۲ درصد خورشید کنونی بود

آیا ثابت خورشیدی در طول چرخه یازده ساله خورشید تغییر می کند؟



$$L_{\odot} = 4\pi r_{\odot}^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

$$T_{\text{eff}} = 5778 \pm 3 \text{ K}$$

تابندگی

$$L = 3.844 \pm 0.010 \times 10^{26} \text{ W}$$

$$L = dm/dt \ c^2$$

$$\rightarrow dm/dt = 4 \times 10^9 \text{ kg/s}$$

$$+ \text{ Solar wind } \sim 1 \times 10^9 \text{ kg/s}$$

آهنگ تبدیل جرم به انرژی

$$\text{Solar life time } \sim 4.5 \text{ Gyr} = 1.5 \times 10^{17} \text{ s}$$

$$\rightarrow \text{total mass loss } \sim 10^{27} \text{ kg}$$

$$dm/dt = 10^{-14} - 10^{-13} M_{\text{sun}}/\text{yr}$$

$$\text{Wolf-Rayet stars: } dm/dt = 10^{-6} M_{\text{sun}}/\text{yr}$$

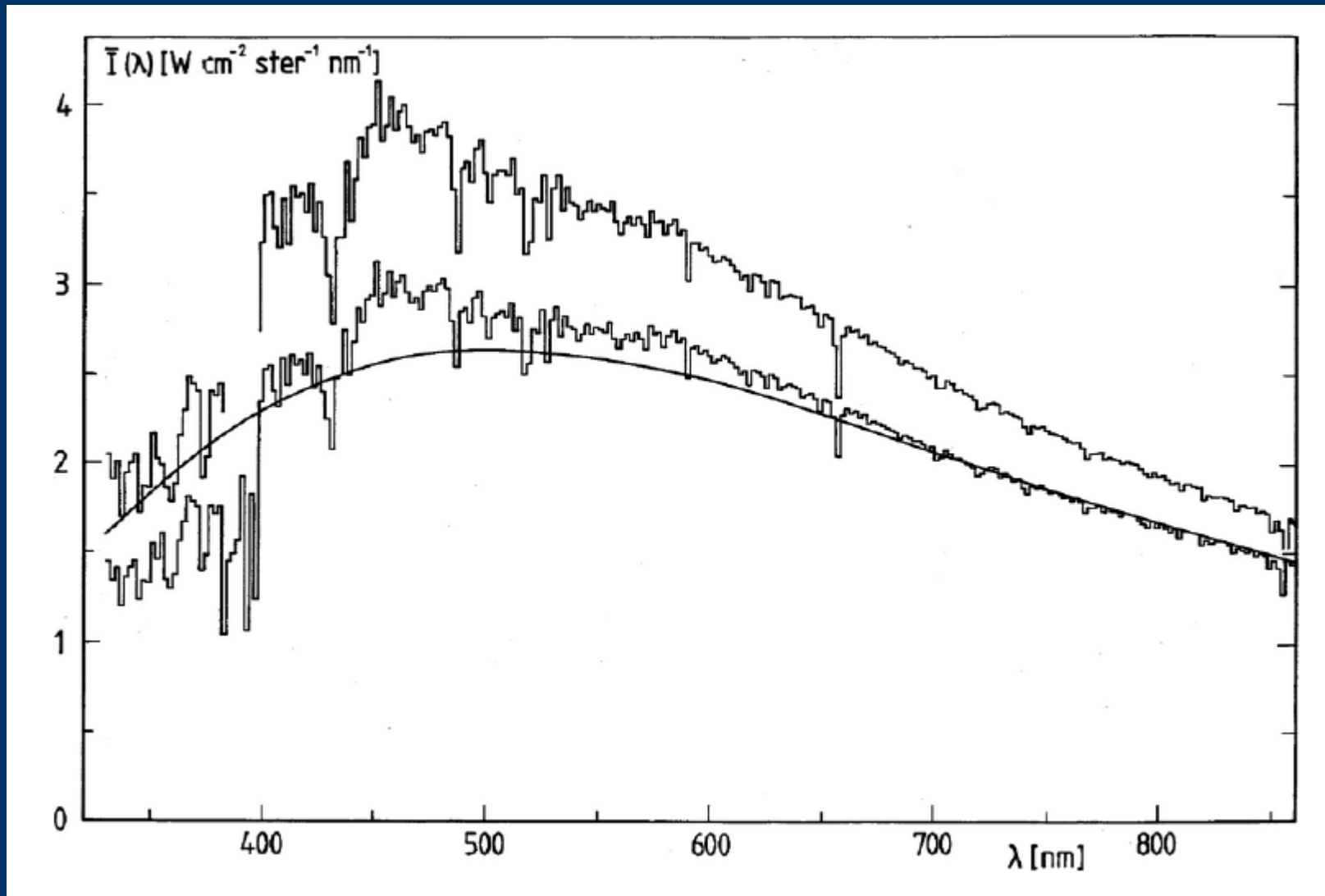
دمای موثر

$$T_{\text{eff}} = 5778 \pm 3 \text{ K}$$

$$L = 4\pi r^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

دمای موثر در کنار گرانش سطحی و ترکیب شیمیایی مهم ترین پارامترهای ستاره هستند

طیف مری خورشید



طیف فرورسرخ خورشید

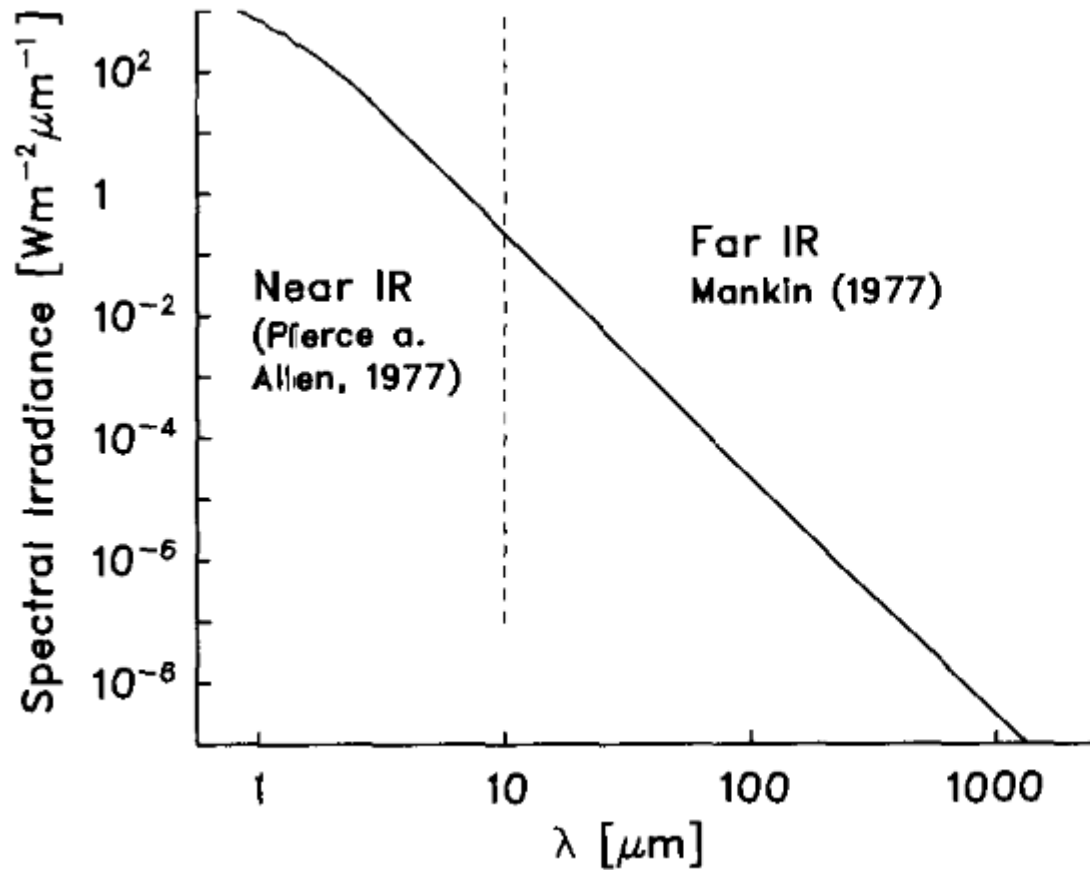


Fig. 1.5. Spectral irradiance at 1 astronomical unit for the infrared solar radiation

Total Solar Irradiance (TSI)

$$\text{TSI} \sim 1367 \pm 3 \text{ W/m}^2$$

$$S = L / 4 \pi a^2 = \text{solar constant}$$

قدر ظاهری

تعریف پارسک = فاصله ای که در آن پراش ستاره برابر یک ثانیه کمانی باشد

قدر مطلق = قدر ظاهری در فاصله ده پارسک

$$m = M + 5 \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right)$$

$$M_{\text{sun}} = 4.74$$

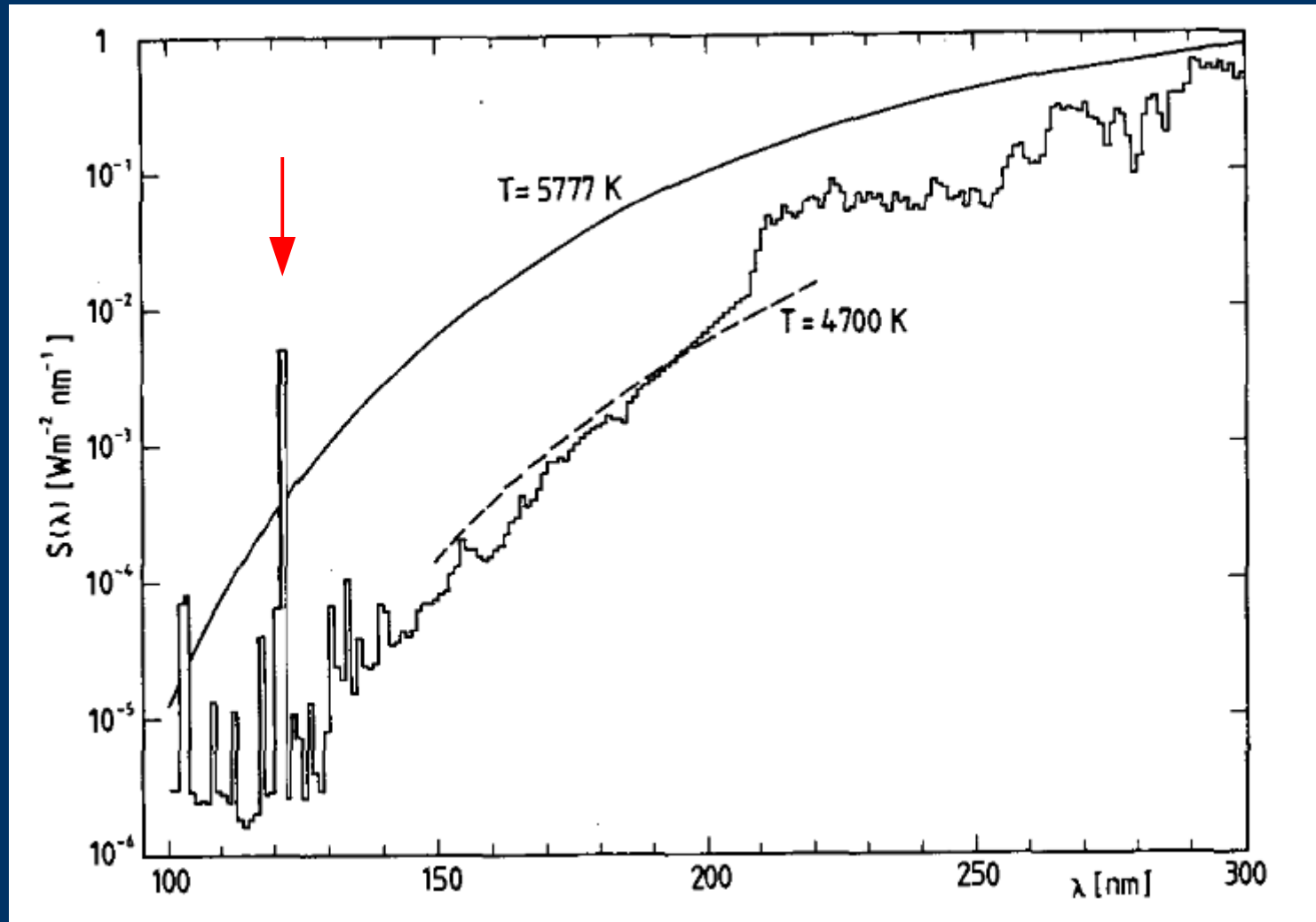
شاخص رنگ

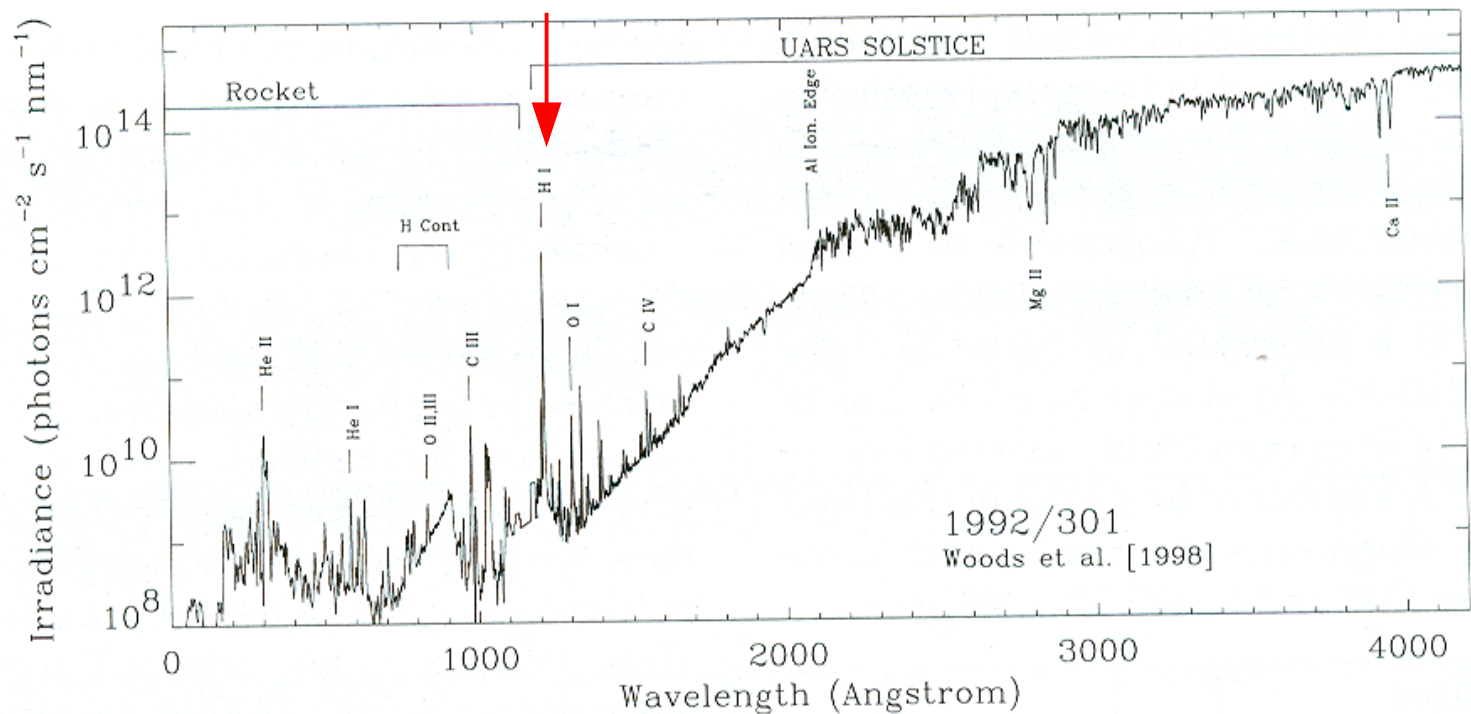
$$U - B = 0.195 \pm 0.005$$

$$B - V = 0.650 \pm 0.005$$

Solar spectral irradiance

$\text{Ly}\alpha = 121.6 \text{ nm}$





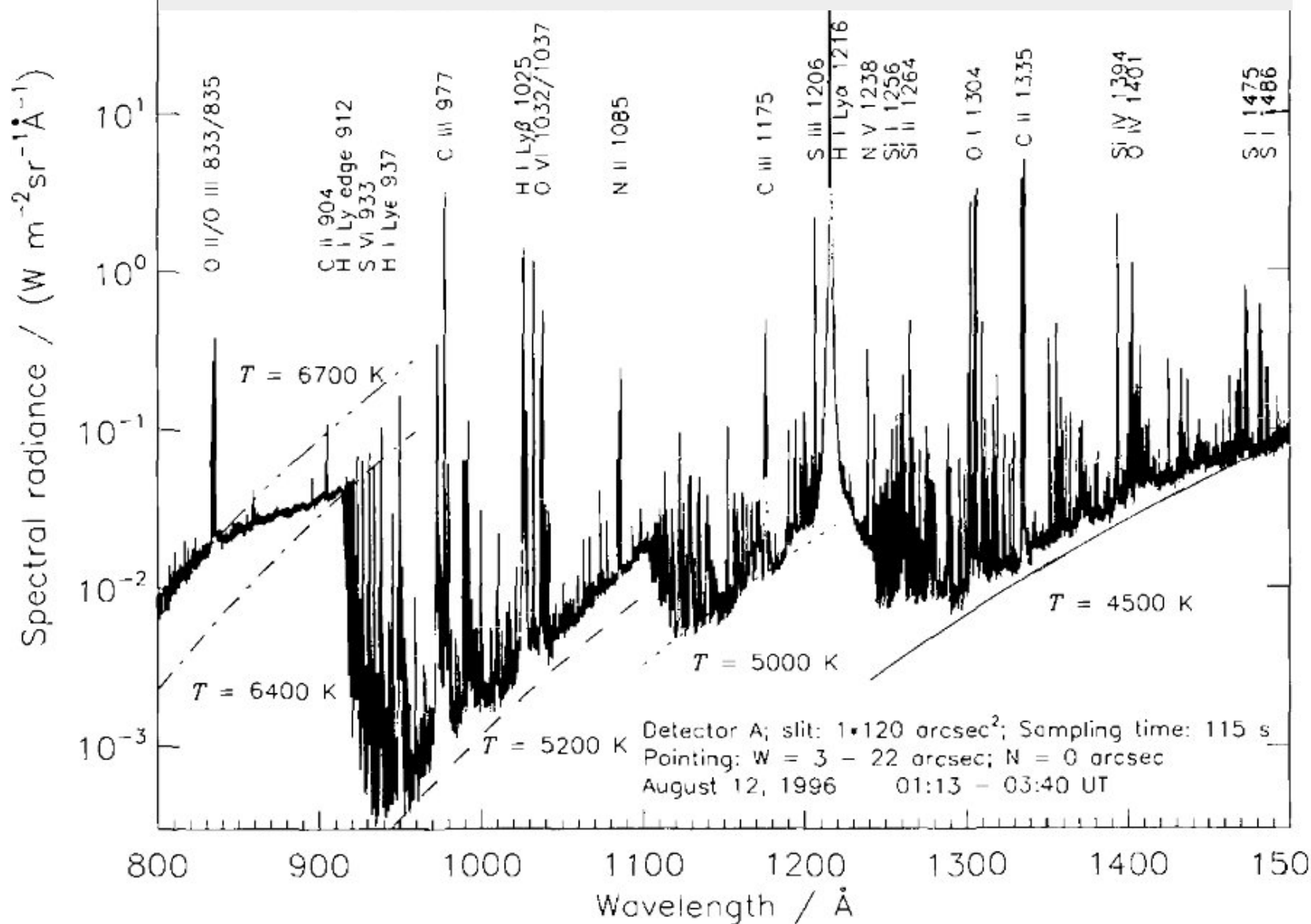
طیف فرابنفش و ایکس

شدت طیف در طول موج های کوچک تر از ۲۱۰ نانومتر به سرعت افت می کند. در حالی که در طول موجهای بزرگتر از ۲۱۰ نانومتر شاهد خط های جذبی هستیم، در طول موج های کوچک تر خط های نشری داریم. طیف خورشید در طول موجهای کوچک تر از ۱۵۰ نانومتر مملو از خط های نشری است. قویترین خط در این ناحیه خط لیمان آلفای هیدروژن است

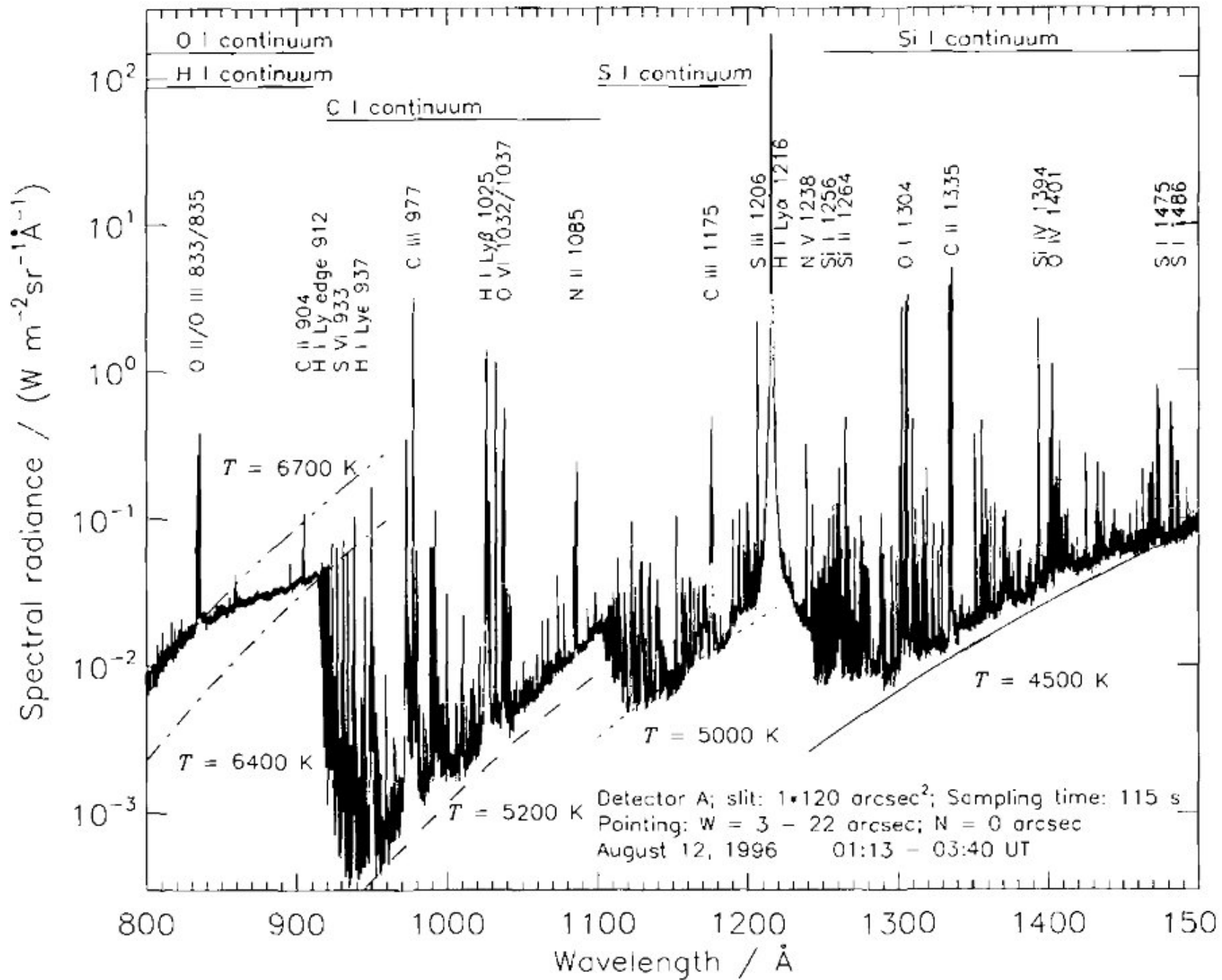
$$\text{Ly}\alpha = 121.6 \text{ nm}$$

در طول موجهای کوچک تر از لیمان آلفا، شاهد خط های بسیار یونیزه هستیم مثل آهن شانزده Fe XVI

طیف فرابنفش خورشید



Wilhelm et al. (1995)



Wilhelm et al. (1995)

Brightness temperature

دمای تابندگی

$$I_{\lambda} = B_{\lambda}(T_B)$$

مفهوم دمای تابندگی چیست؟

آیا می توانیم برای یک خط طیفی دمای تابندگی تعریف کنیم؟

B_{λ} : Planck function

I_{λ} : observed intensity

T_B : brightness temperature

$$B_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT} - 1)}, \quad \text{i.e.,} \quad B_{\lambda} \simeq \frac{2ckT}{\lambda^4}$$

$$T_B(10 \mu\text{m}) = 5100 \text{ K}$$

$$T_B(100 \mu\text{m}) = 4400 \text{ K}$$

$$T_B(1 \text{ mm}) = 6000 \text{ K}$$

$$T_B(1 \text{ cm}) = 10^4 \text{ K}$$

$$T_B(1 \text{ m}) = 10^6 \text{ K}$$

طیف پیوستار از کجا می آید؟

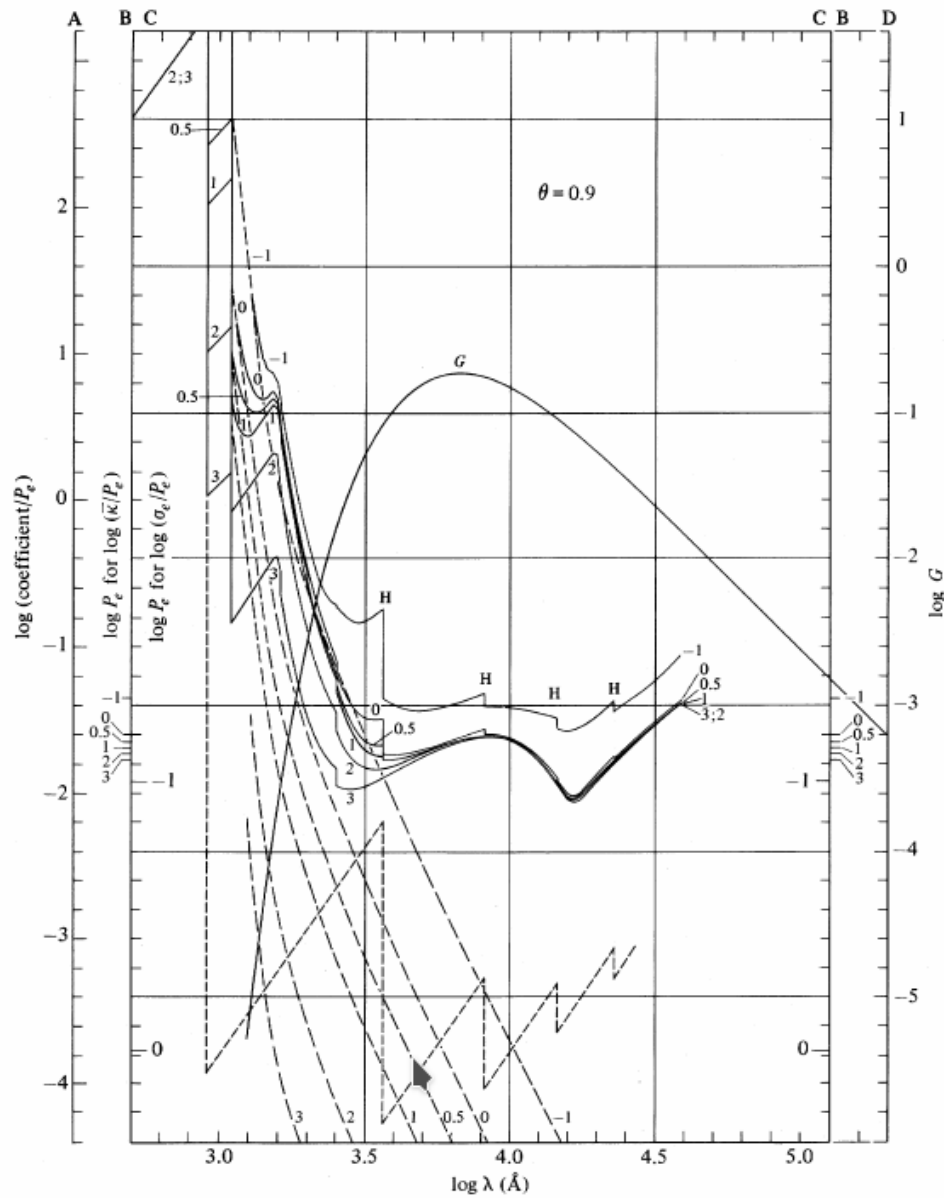
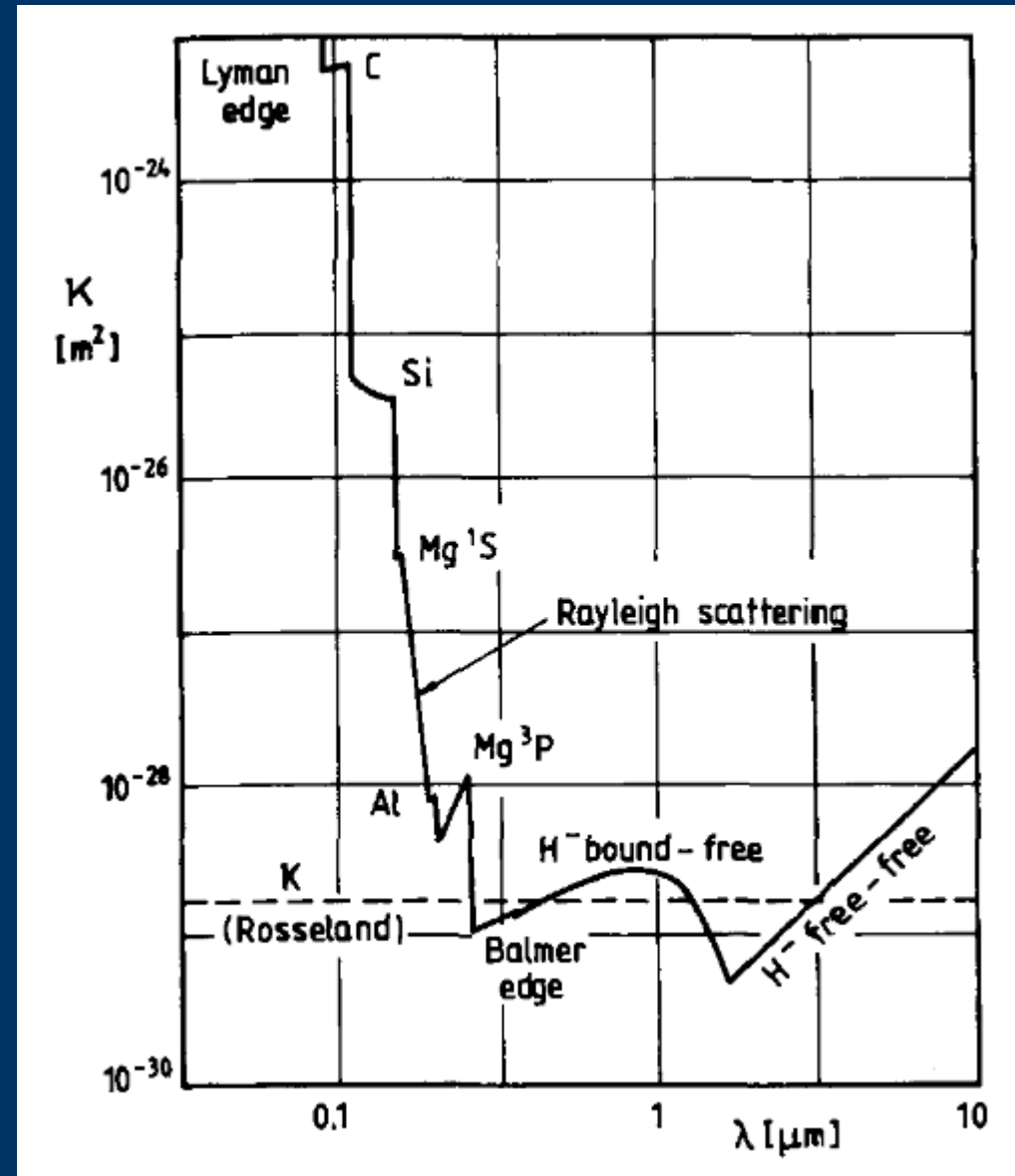
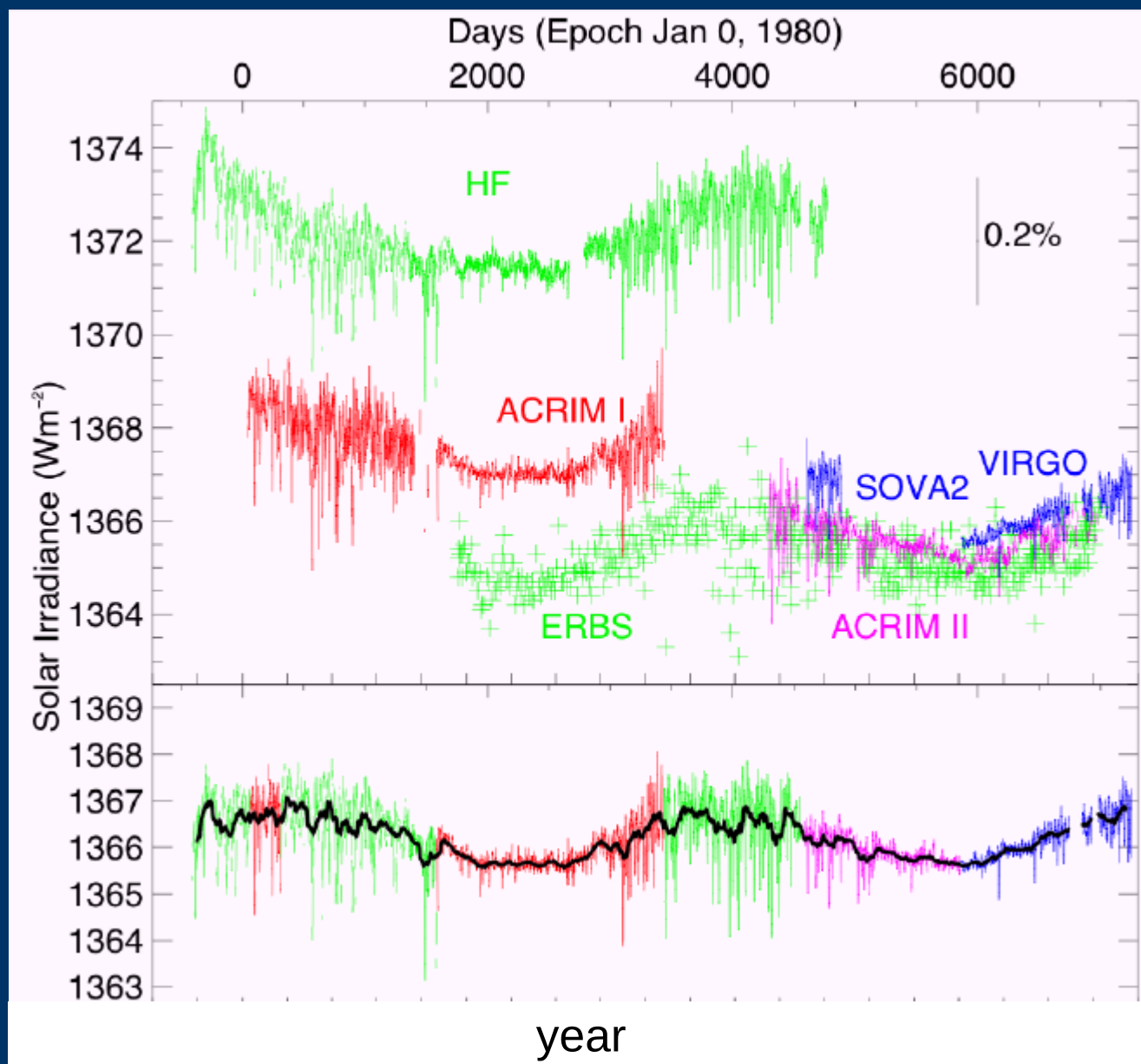


Figure 8.6: Vitense diagram of the continuous extinction in the atmospheres of stars with solar effective temperature ($\theta \equiv 5040/T_e = 0.9$ or $T_e = T_{\text{eff}}^{\odot} = 5600 \text{ K}$). Solid curve marked G: Rosseland weighting factor in (8.1). Solid curves marked by numbers: base-10 logarithm of total continuous extinction coefficient κ_{λ} ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$) divided by the electron pressure P_e as specified along scale A on the lefthand side. These curves are labeled with $\log P_e$. The hydrogen bound-free edges are labeled along the $\log P_e = -1$ curve. Jagged dashed curve: total HI extinction coefficient (bound-free plus free-free) on a shifted scale. Smooth dashed curves: $\log(\sigma_{\text{H}}/P_e)$ with σ_{H} the extinction from Rayleigh scattering, also labeled with $\log P_e$. Horizontal axis: logarithm of the wavelength in Angstrom. Vertical axes: scale A specifies $\log(\kappa_{\lambda}/P_e)$, except for the jagged HI curve which is offset by factors given by Novotny on p.135. Scale B specifies the value of $\log P_e$ at which scale A is to be read to obtain $\log \bar{\kappa}/P_e$ where $\bar{\kappa}$ is the wavelength-averaged extinction coefficient. Scale C defines the value of $\log P_e$ at which scale A is to be read to obtain $\log \sigma_e/P_e$ where σ_e is the extinction coefficient for Thomson scattering in $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Scale D (on the right) specifies $\log G$. See also Exercise 10 on page 232. From Novotny (1973).



Unsöld & Baschek (1999)

ثابت خورشیدی ثابت نیست



Spectral Energy Distribution (SED)

شار انرژی تابش شده در سطح خورشید با فرض تقارن کروی

$$r_{\odot}^2 F(\lambda) = A^2 S(\lambda)$$

شار انرژی رسیده به زمین

شار انرژی در سطح خورشید

شدت: انرژی تابش شده در واحد سطح، زمان، طول موج و زاویه فضایی

تا زاویه بین راستای انتشار و بردار نرمال سطح است

$$I(\theta, \lambda)$$

Internal structure:

inner core
radiative zone
convection zone

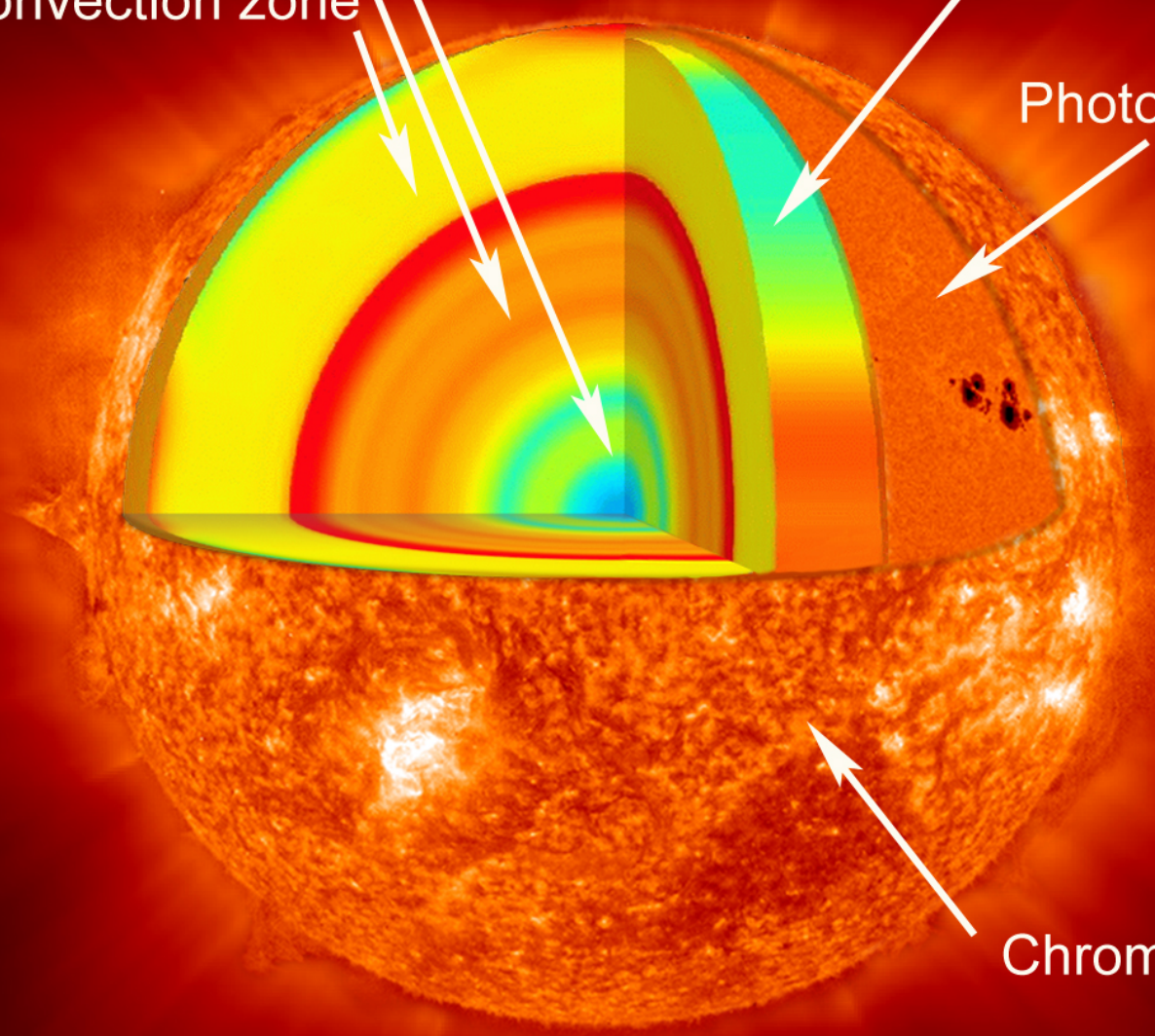
Subsurface flows

Photosphere

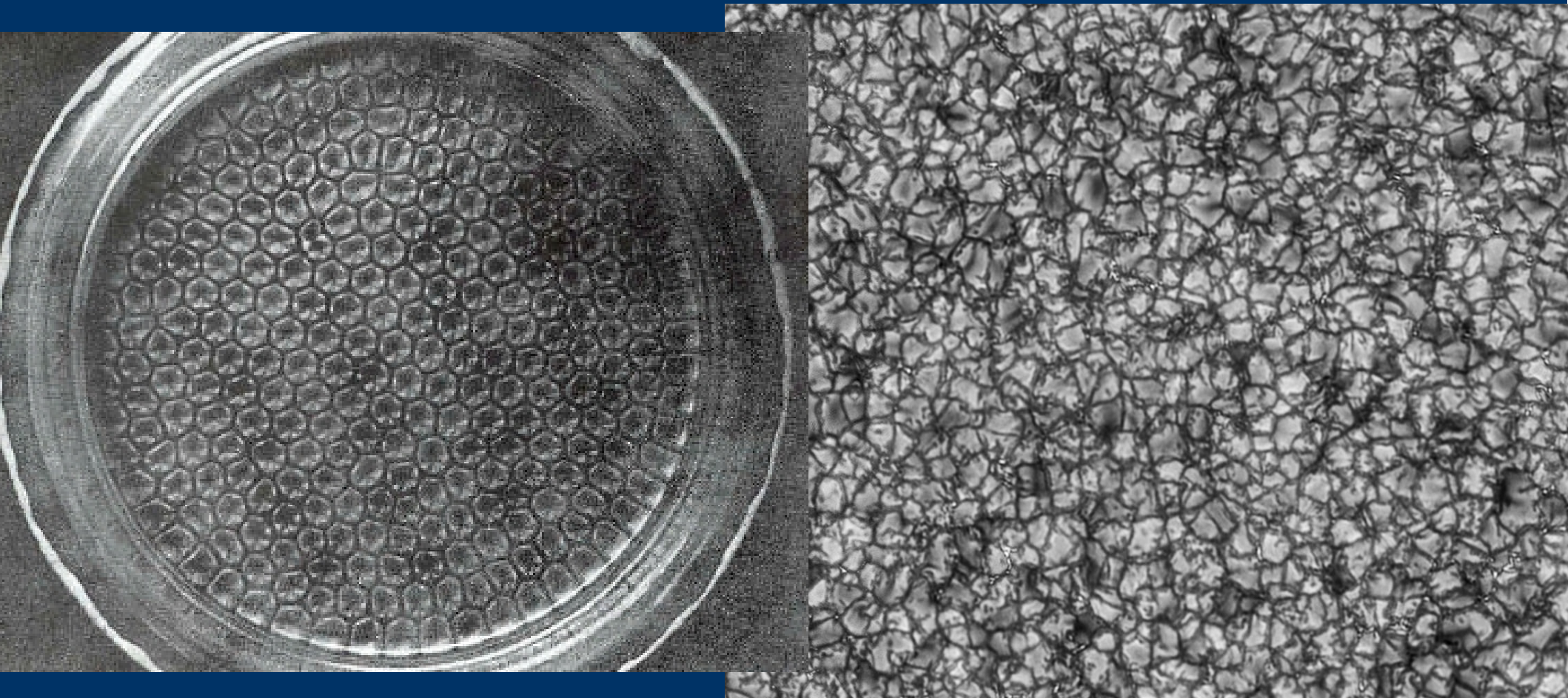
Chromosphere

Corona

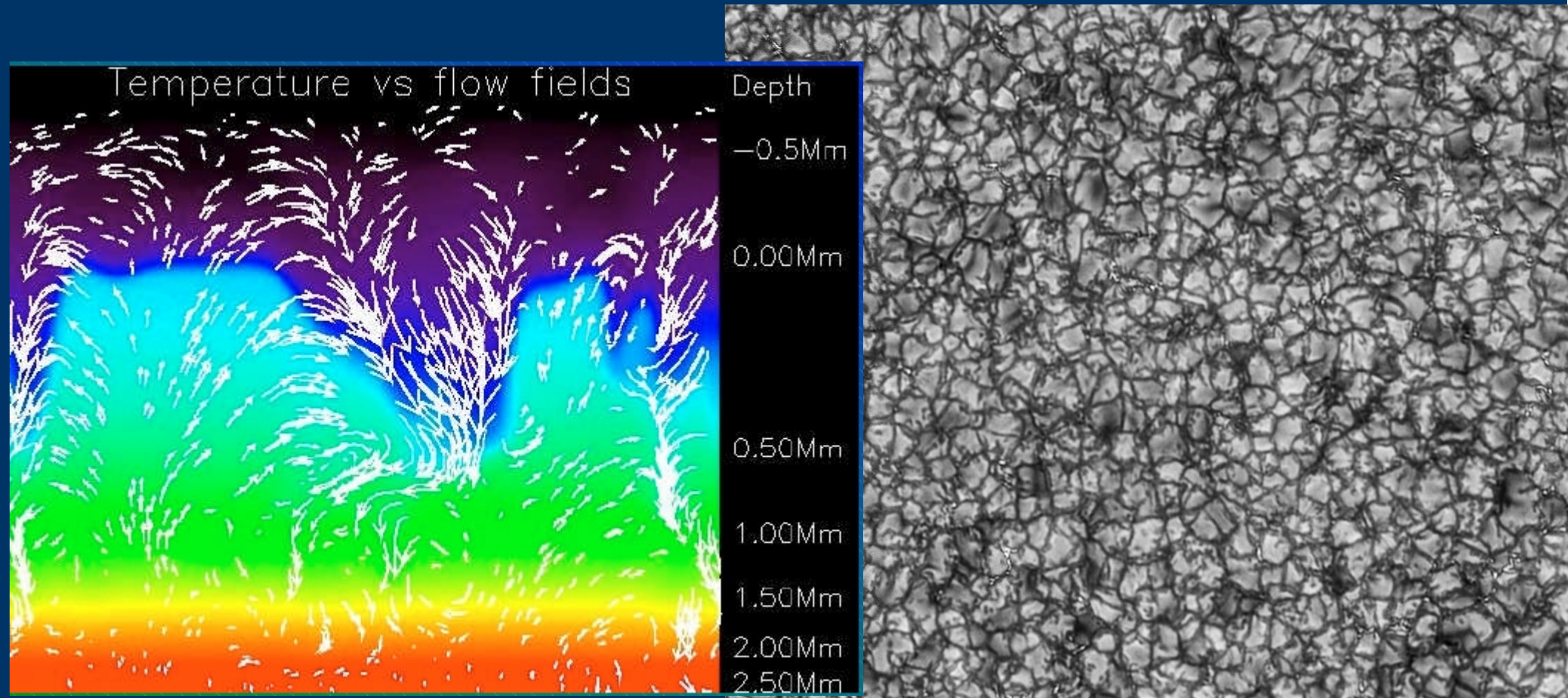
Hinode galaxy



همرفت در نور سپهر و آزمایشگاه



دانه های سطح خورشید ساختار همرفتی هستند



همرفت در اختر فیزیک

مهمترین راه انتقال انرژی در کنار تابش از عمق به سطح ستاره است

ساختار سطحی ستارگان کم جرم ناشی از همرفت است (دانه ها)

منجر به ایجاد میدان های مغناطیسی بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس می شود

انرژی مکانیکی لازم برای گرمایش فام سپهر و تاج و باد خورشیدی را فراهم می کند

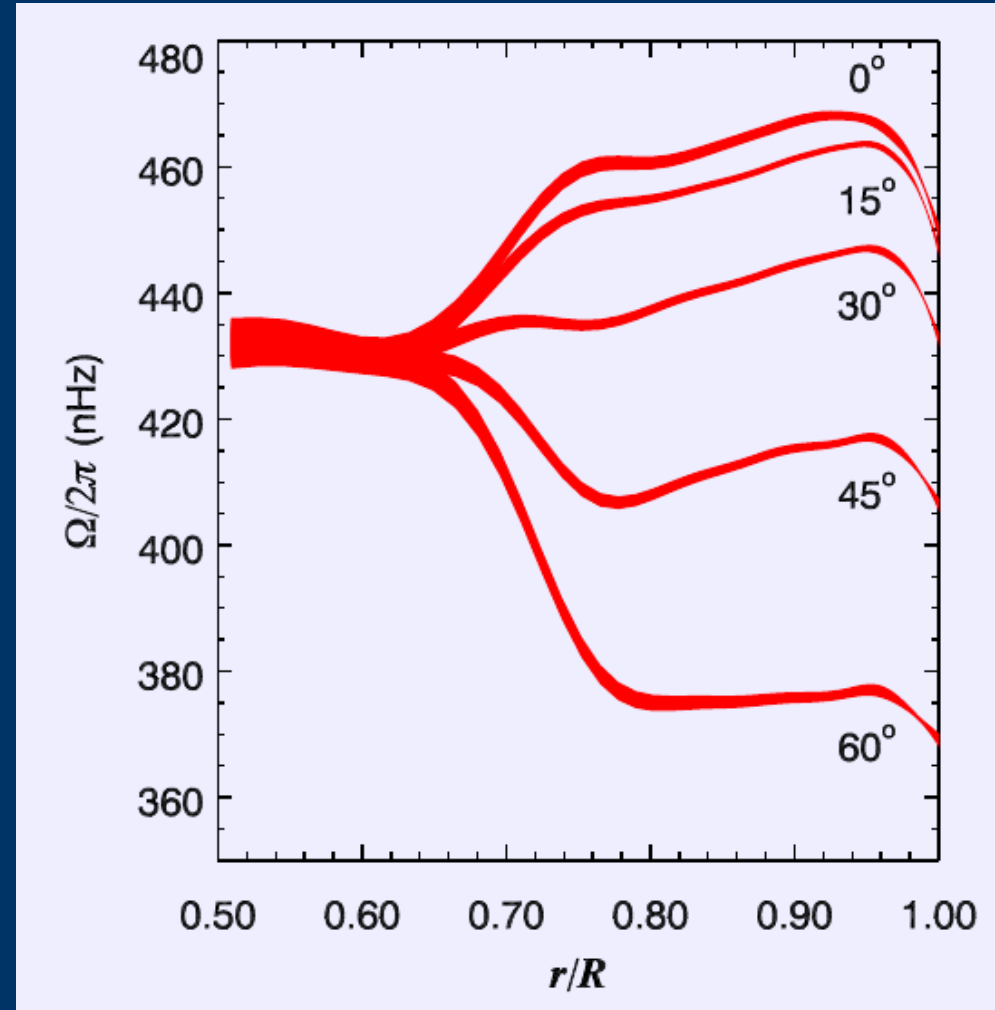
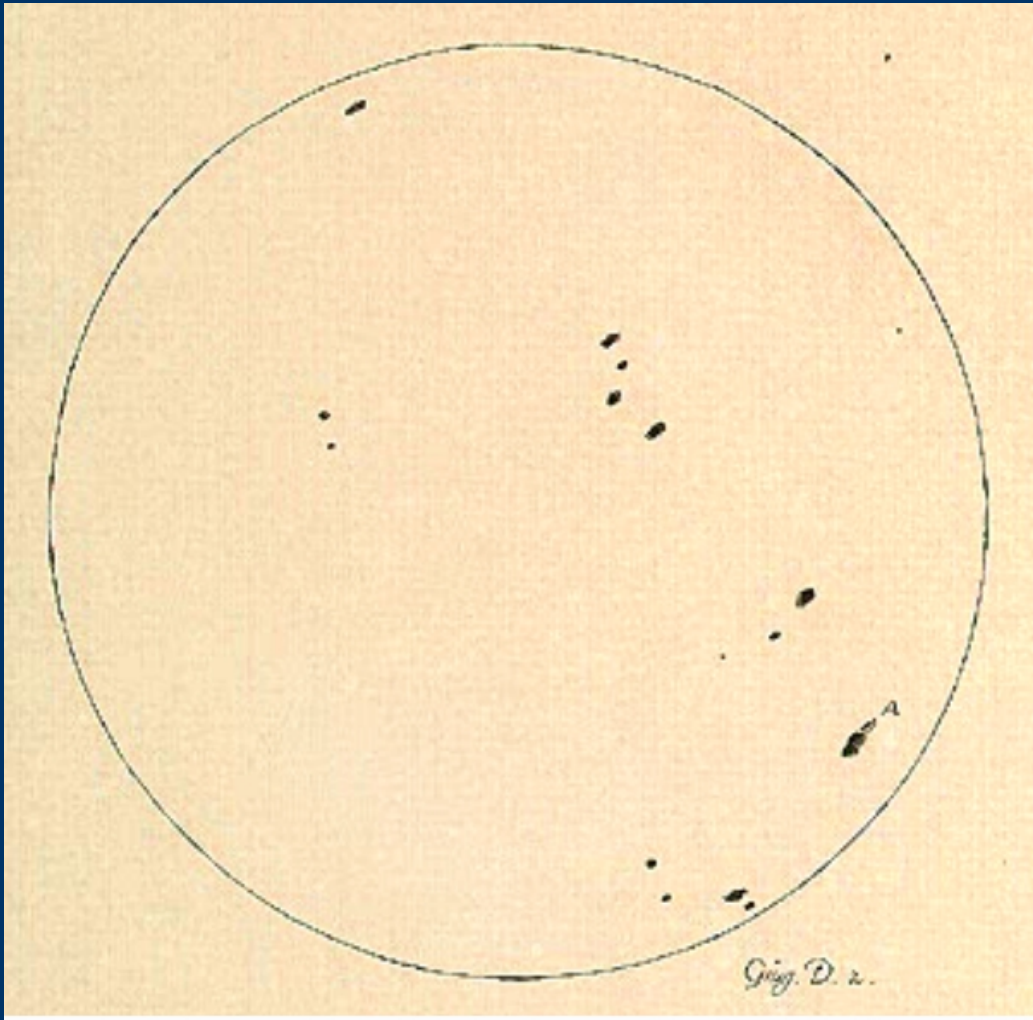
منجر به نوسانات بزرگ مقیاس در ستاره می شود

دوران دیفرانسیلی تولید می کند

همه جا هست: پوسته ستارگان کم جرم، هسته ستارگان پر جرم، قرص های برافزایشی، جو و عمق سیاره ها

تفاوت همرفت در سطح خورشید و آزمایشگاه: تراکم پذیری، میدان گرانشی قوی

دوران دیفرانسیلی



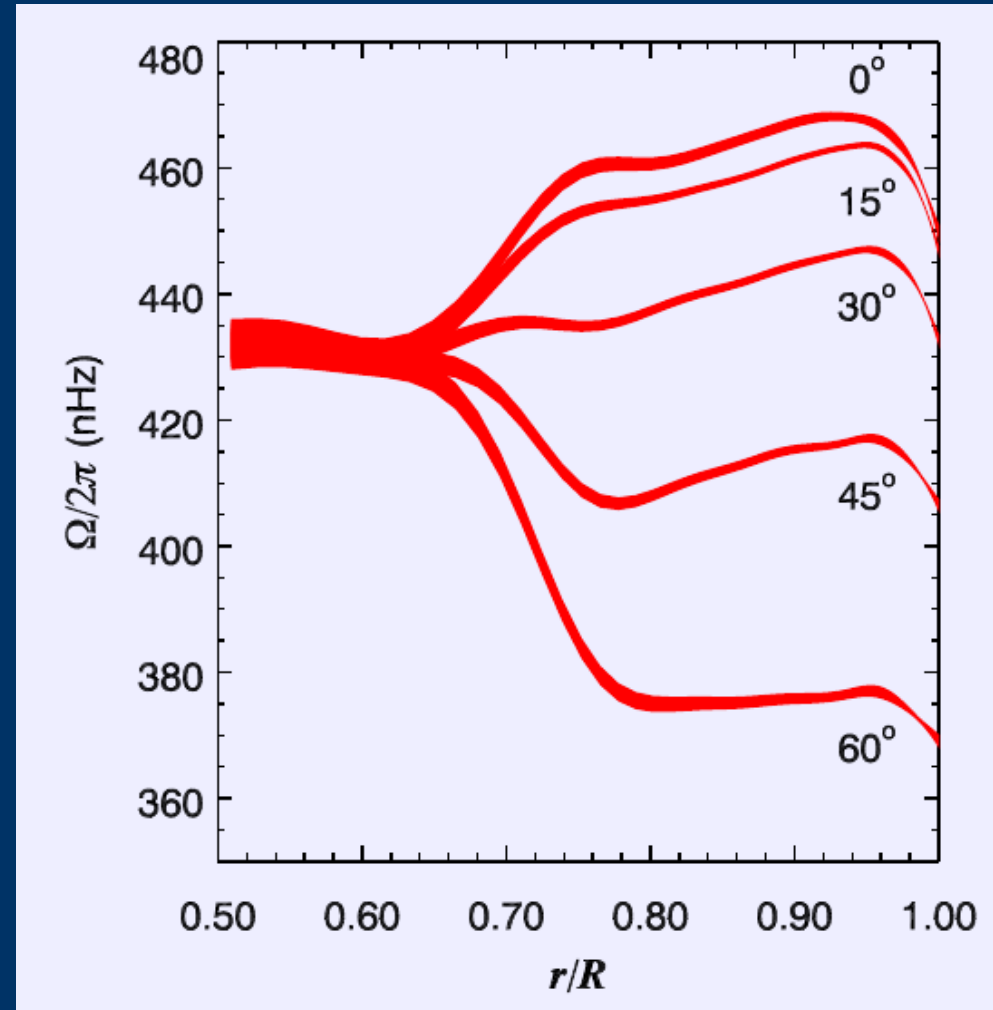
طراحی گالیله از مکان لکه های خورشید

دوران دیفرانسیلی

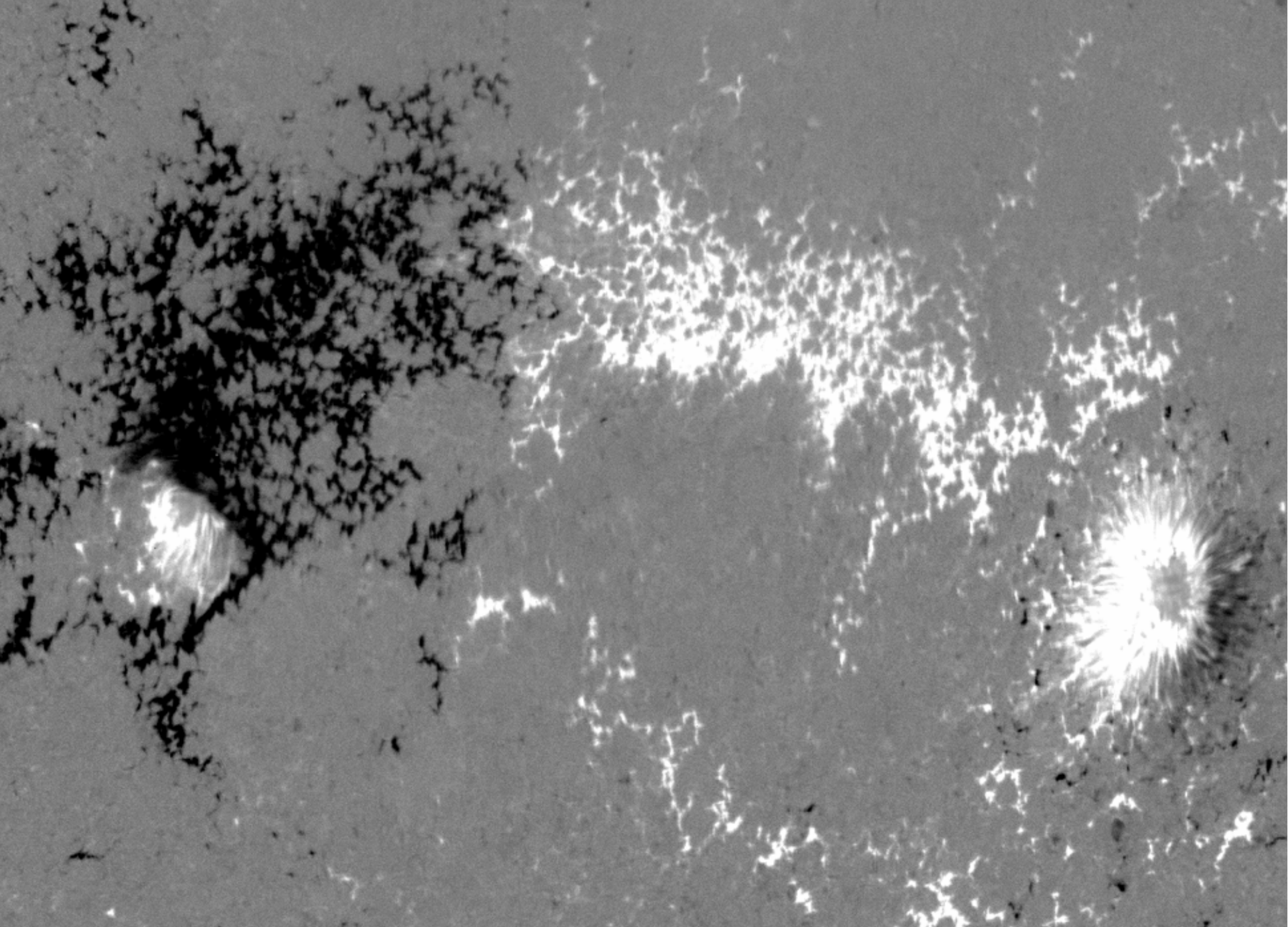
فقط ناحیه همرفتی دوران دیفرانسیلی دارد

دوران دیفرانسیلی هم تابع عرض جغرافیایی و هم تابع عمق است

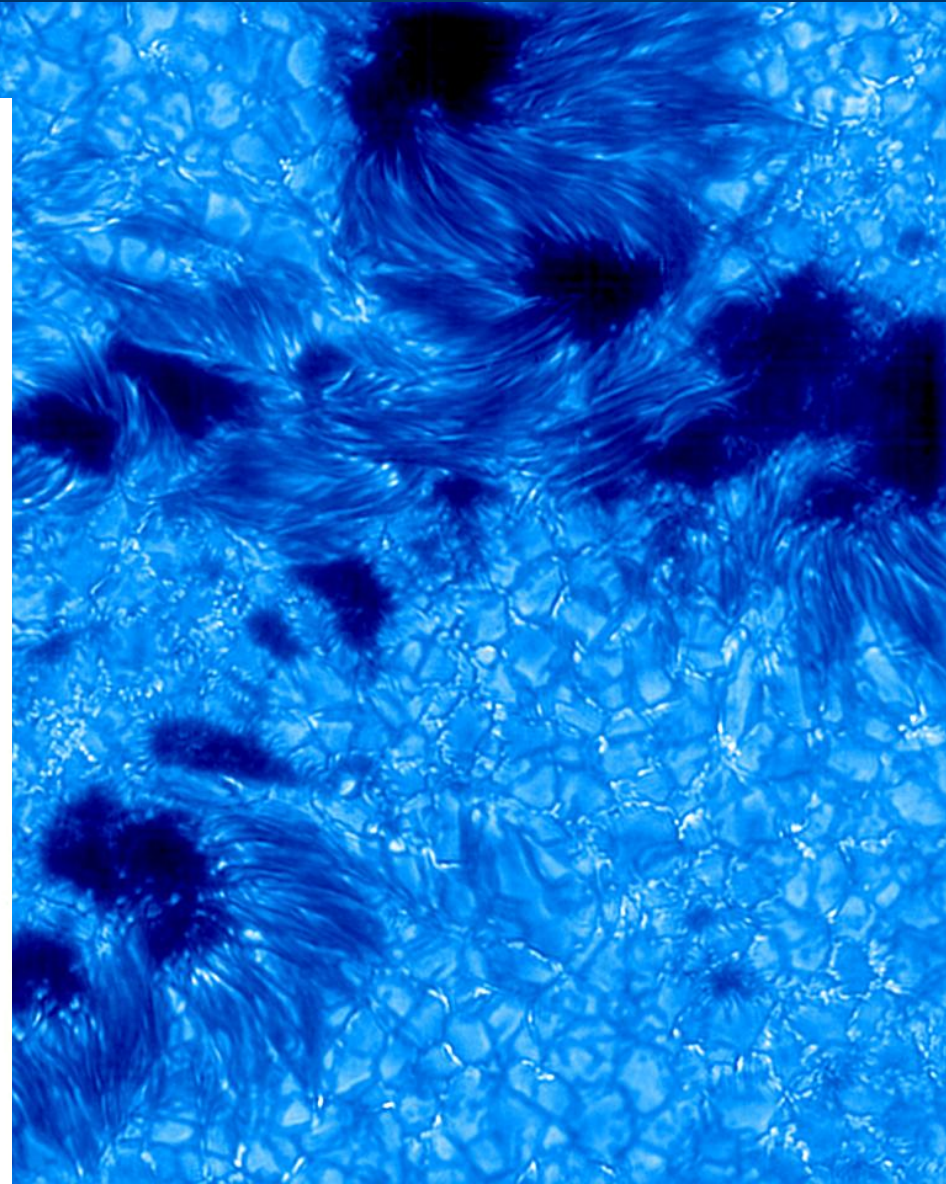
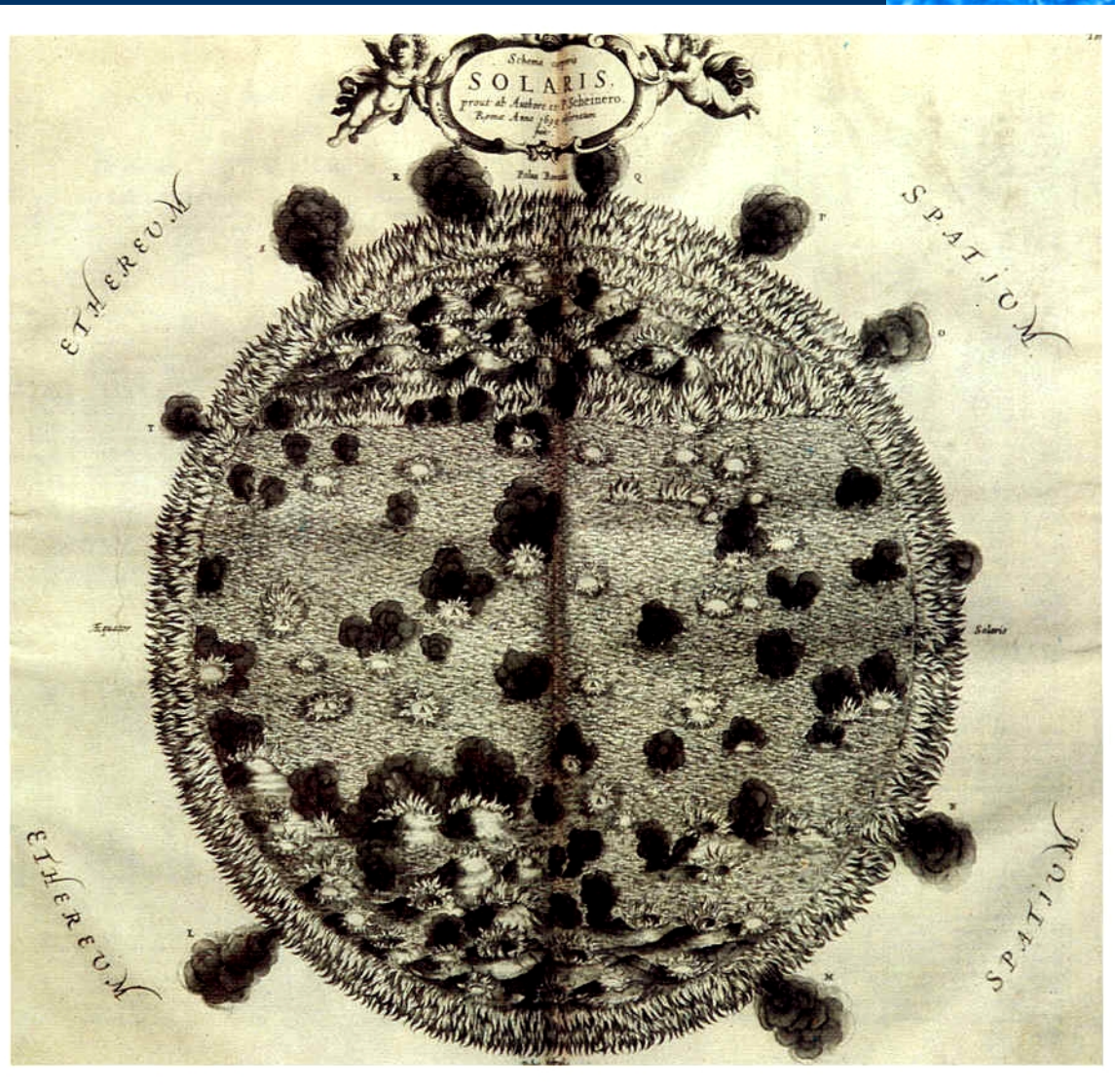
از لرزه شناسی خورشیدی اطلاعاتی درباره آهنگ دوران در لایه های عمیق خورشید به دست می آوریم



مگنتوگرام چیست؟

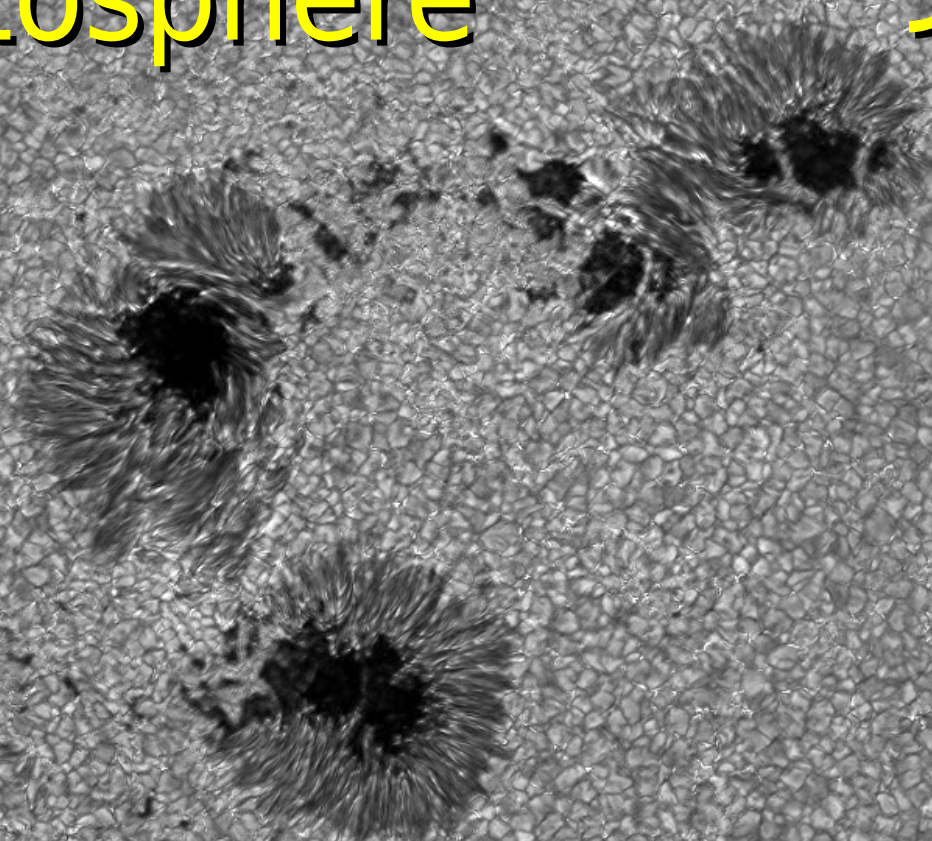


دلیل شکل گیری لکه های خورشید چیست؟



The photosphere

نور سپهر



DOT, La palma.

The chromosphere

فام سپهر

DOT, La palma.

The chromosphere

فام سپهر

DOT, La palma.

ناحیه گذار

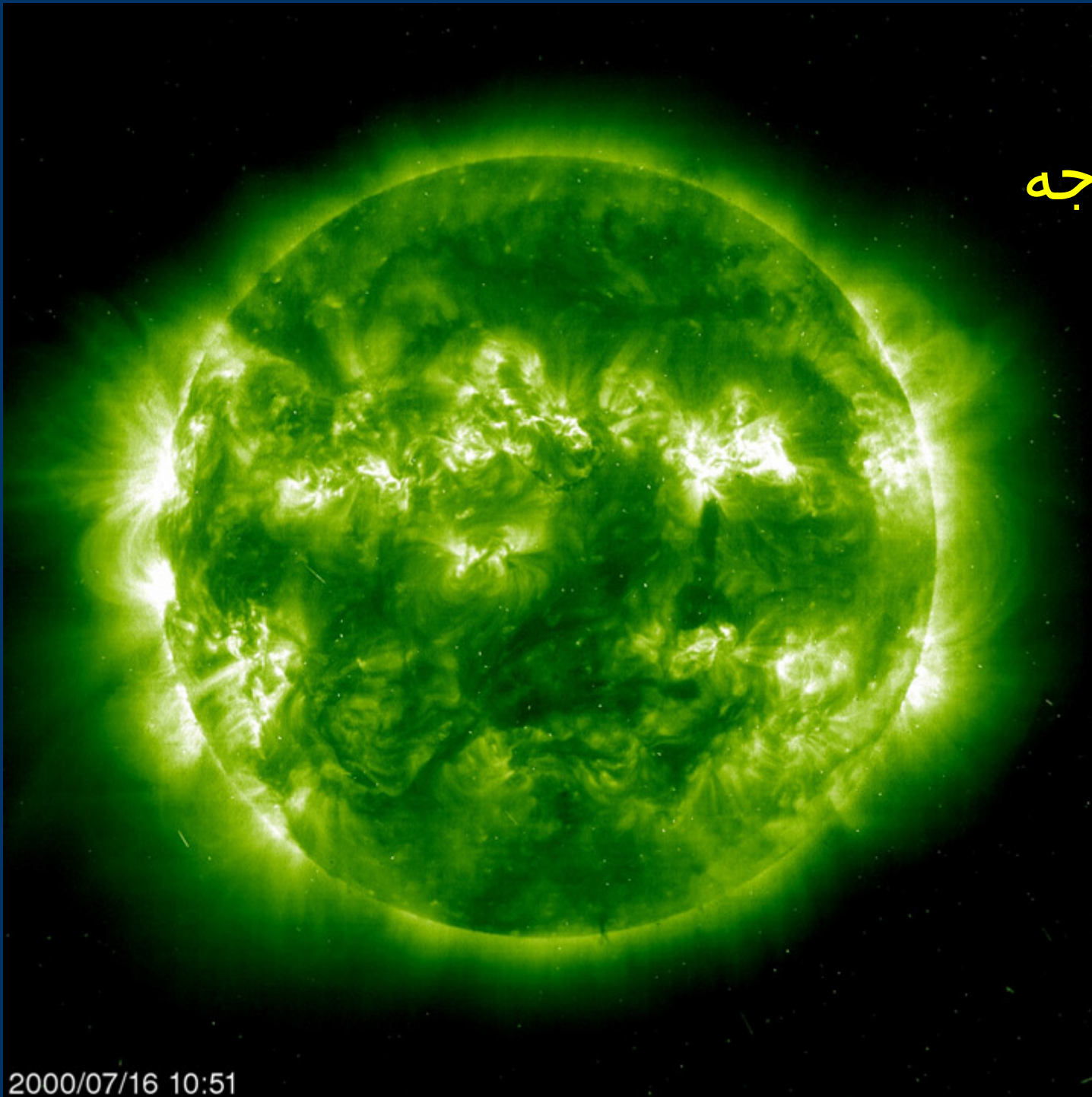
The Transition Region

$T \sim 80 \text{ kK}$

2003/04/11 01:19

SOHO, EIT

تاج یک میلیون درجه

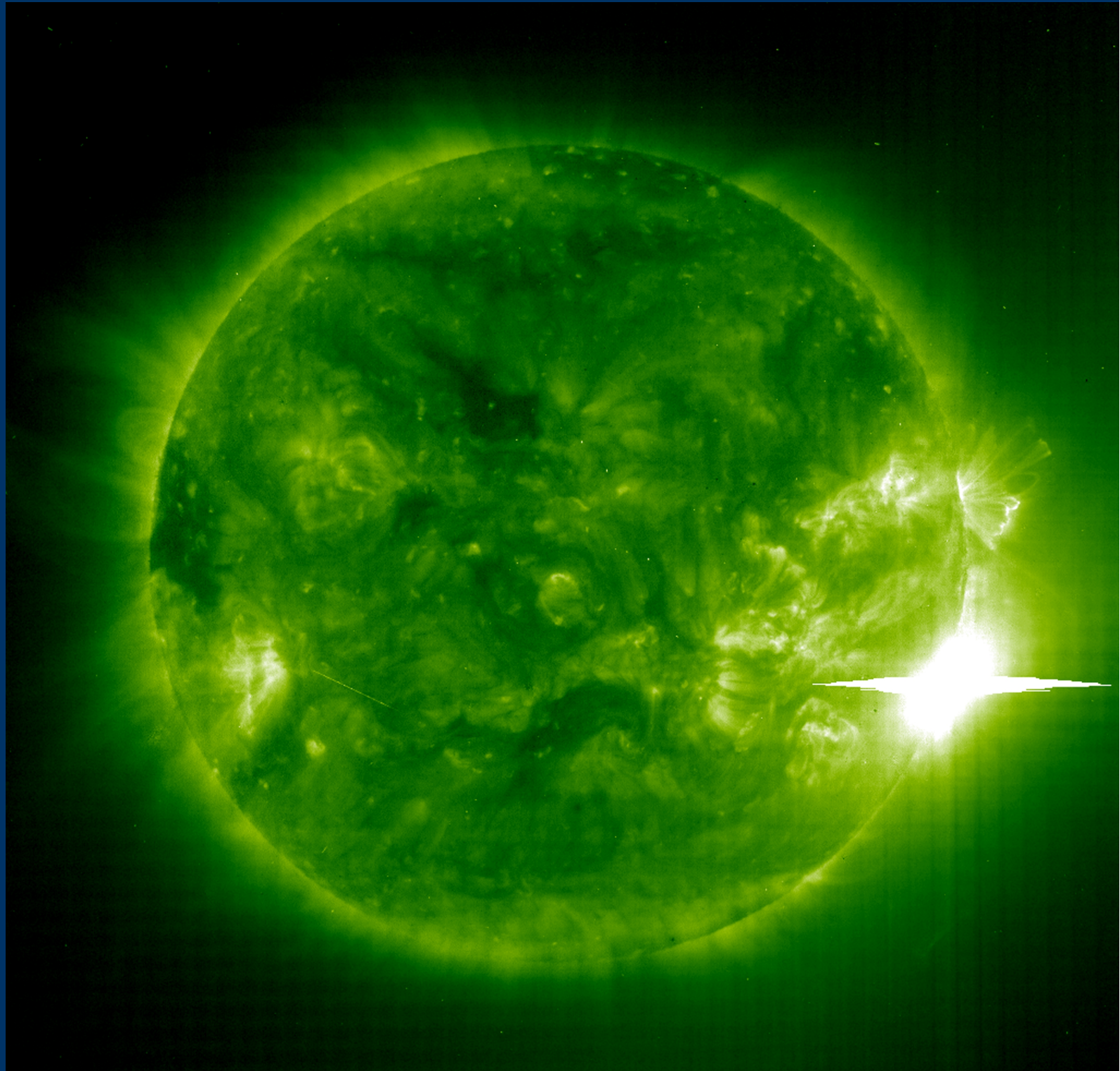


SOHO, EIT



2000/07/16 10:51

شراره چیست؟



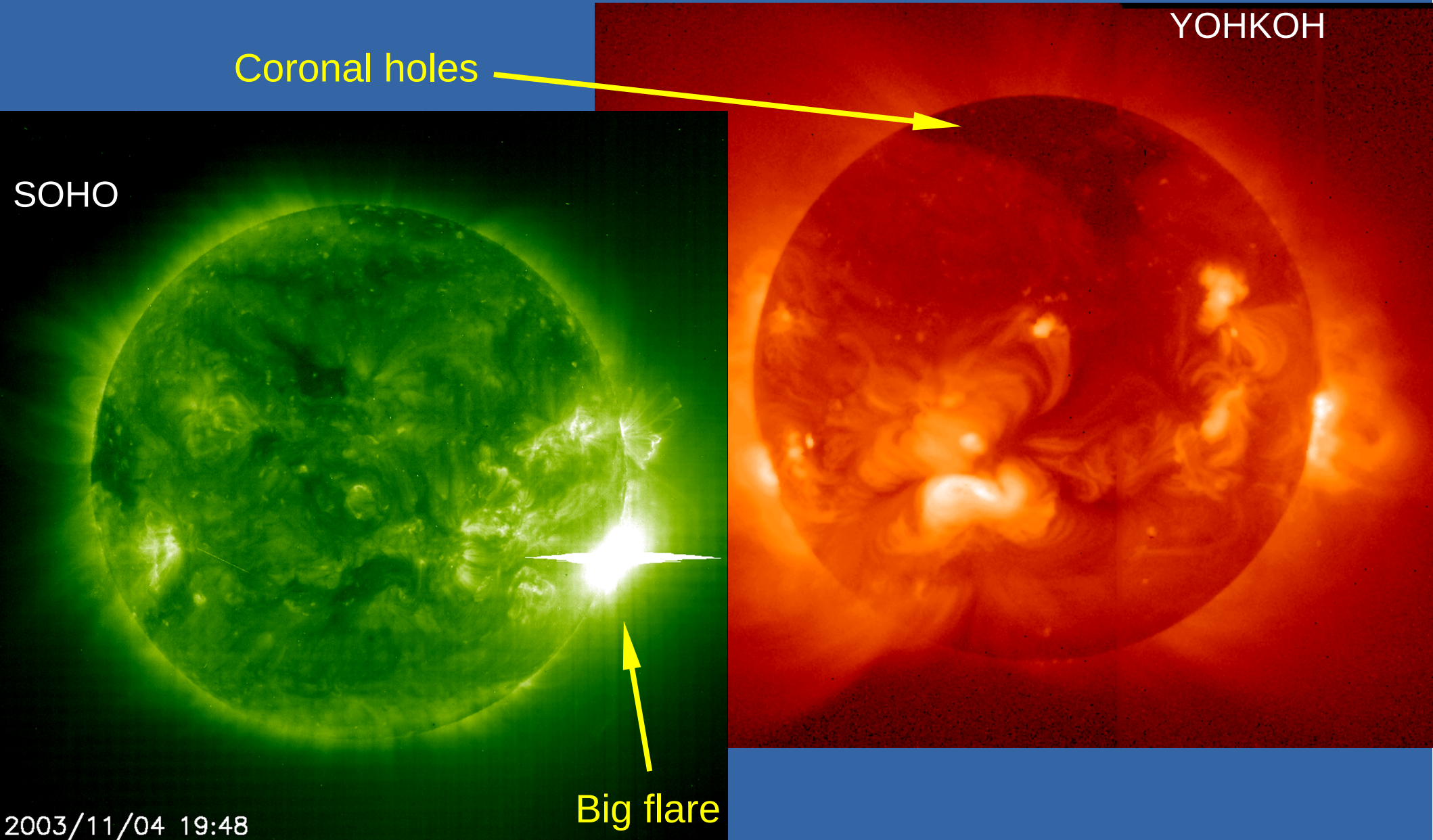
SOHO, EIT

رضا رضایی، دانشکده فیزیک

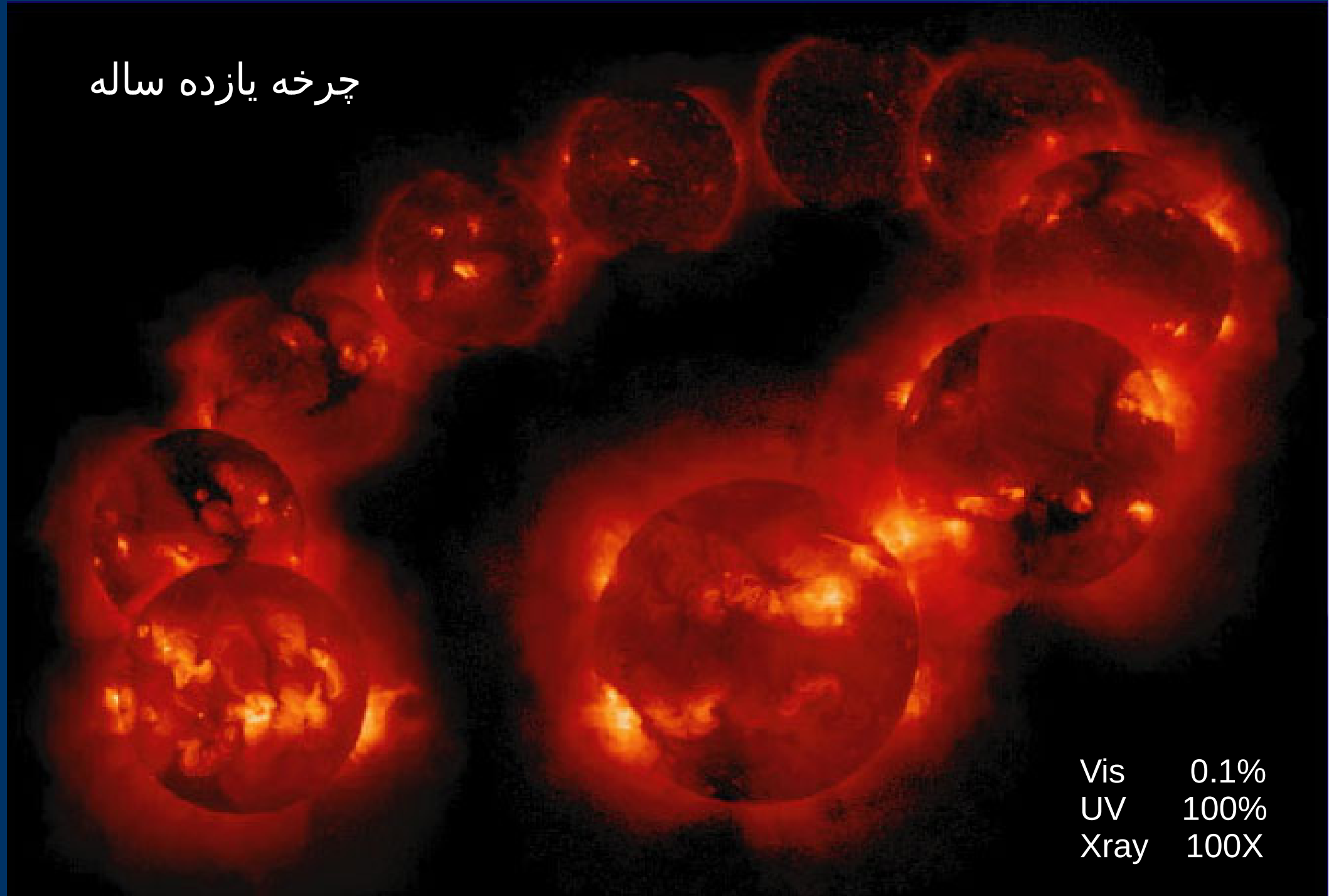
سمینار دوم، خورشید به عنوان یک ستاره

فیزیک خورشید،

تاج خورشید در طول موج ایکس



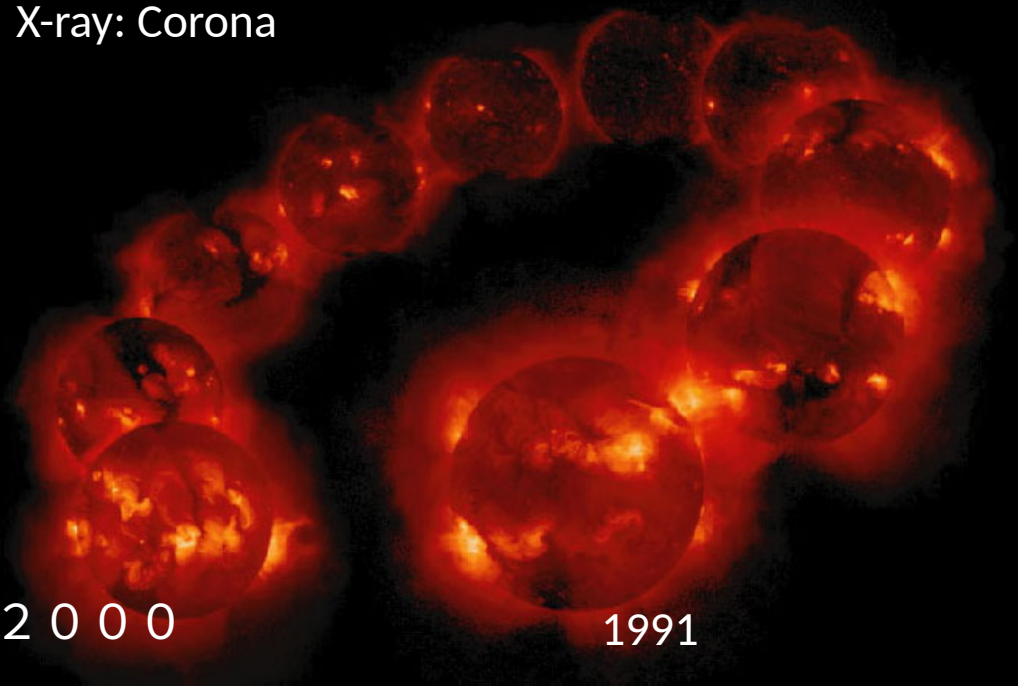
چرخه یازده ساله



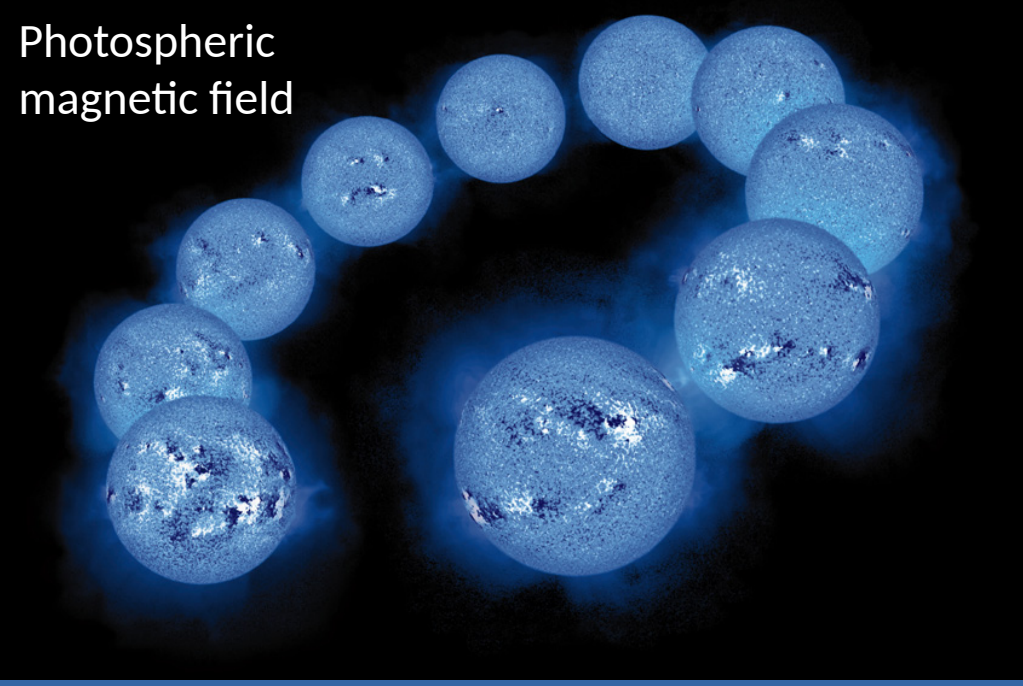
Vis	0.1%
UV	100%
Xray	100X

تغییر تعداد لکه ها در چرخه یازده ساله همراه است با

X-ray: Corona

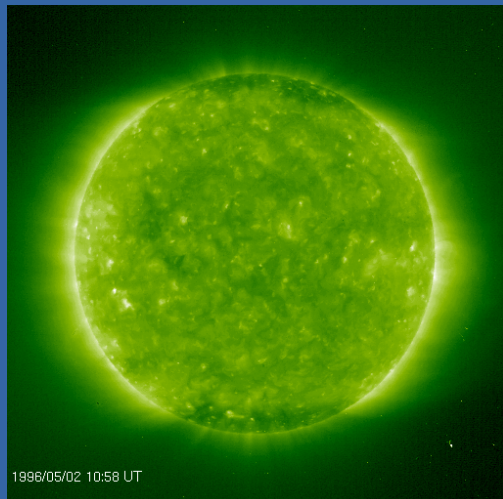


Photospheric magnetic field



تغییر فراوانی شراره های خورشید

تغییر میدان مغناطیسی بزرگ مقیاس خورشید



May 1996

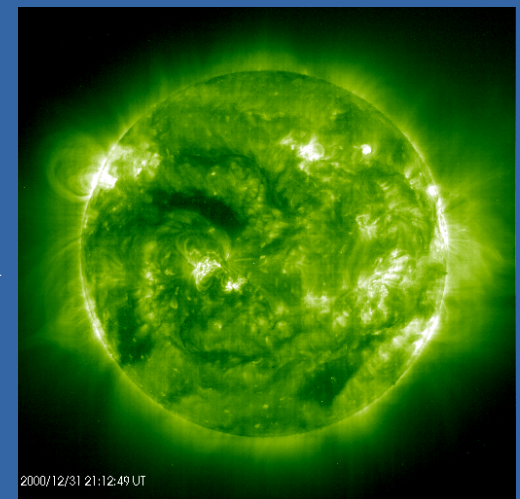
Minimum



EIT/SOHO, Fe XII, 2 MK

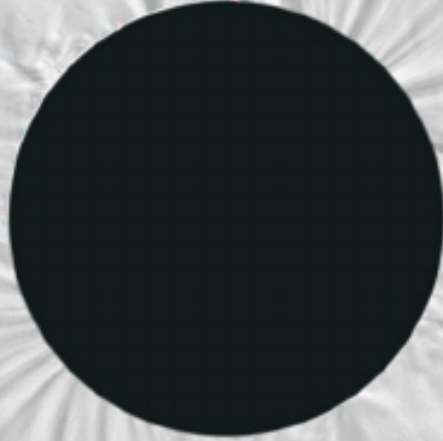
December 2000

Maximum

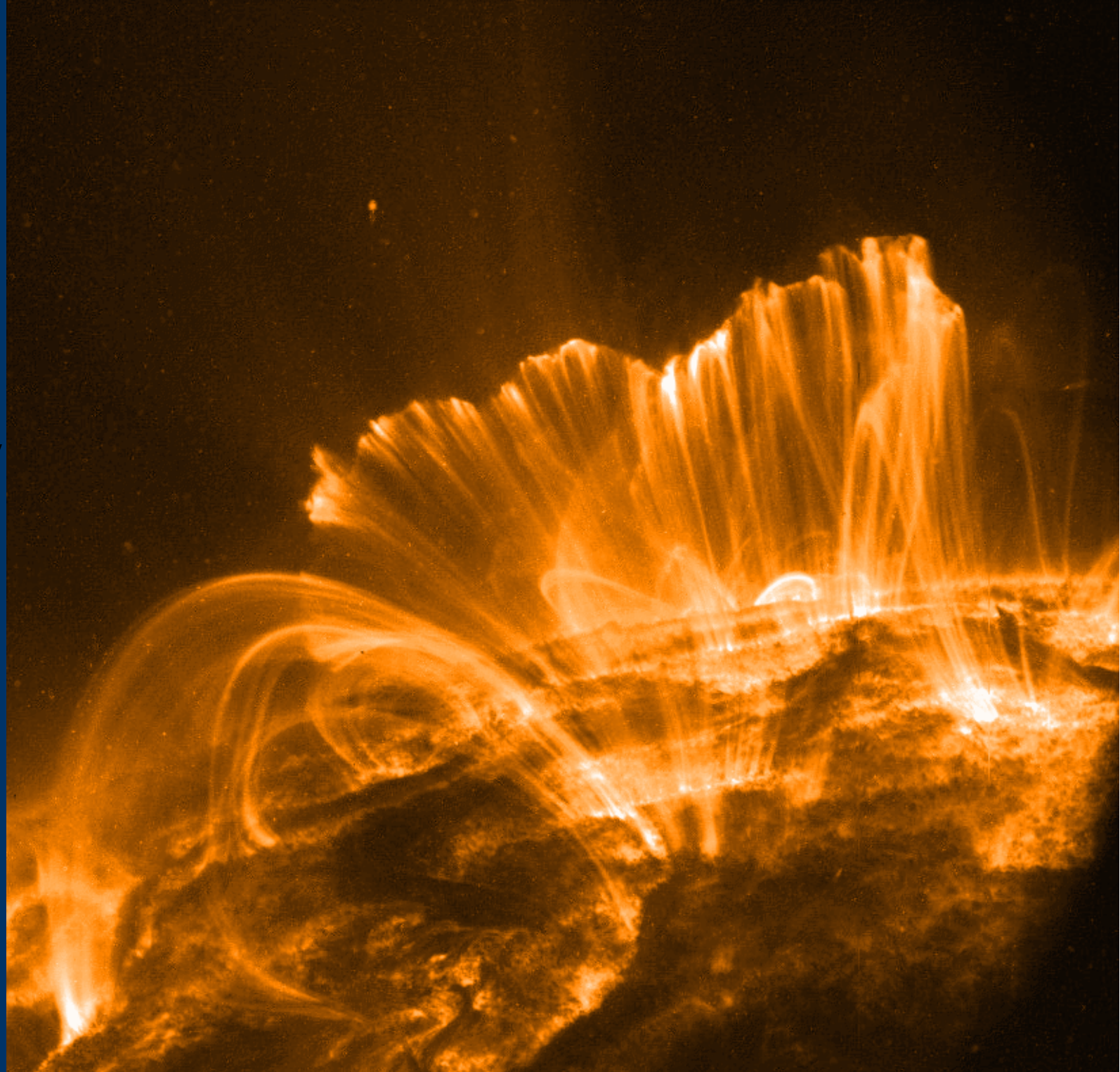


The solar corona

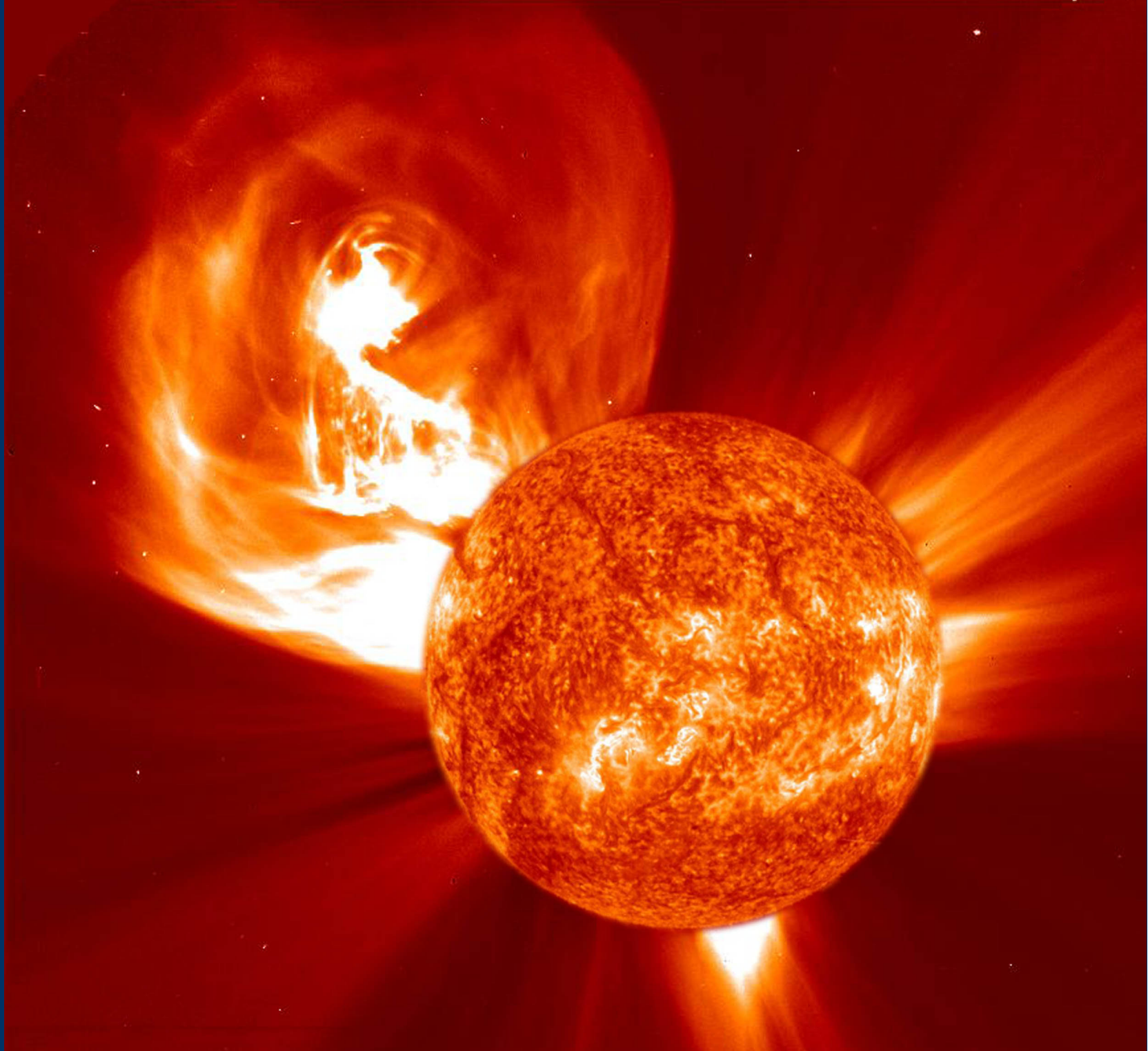
تاج (در حین گرفت)



Flare arcade,
TRACE gallery

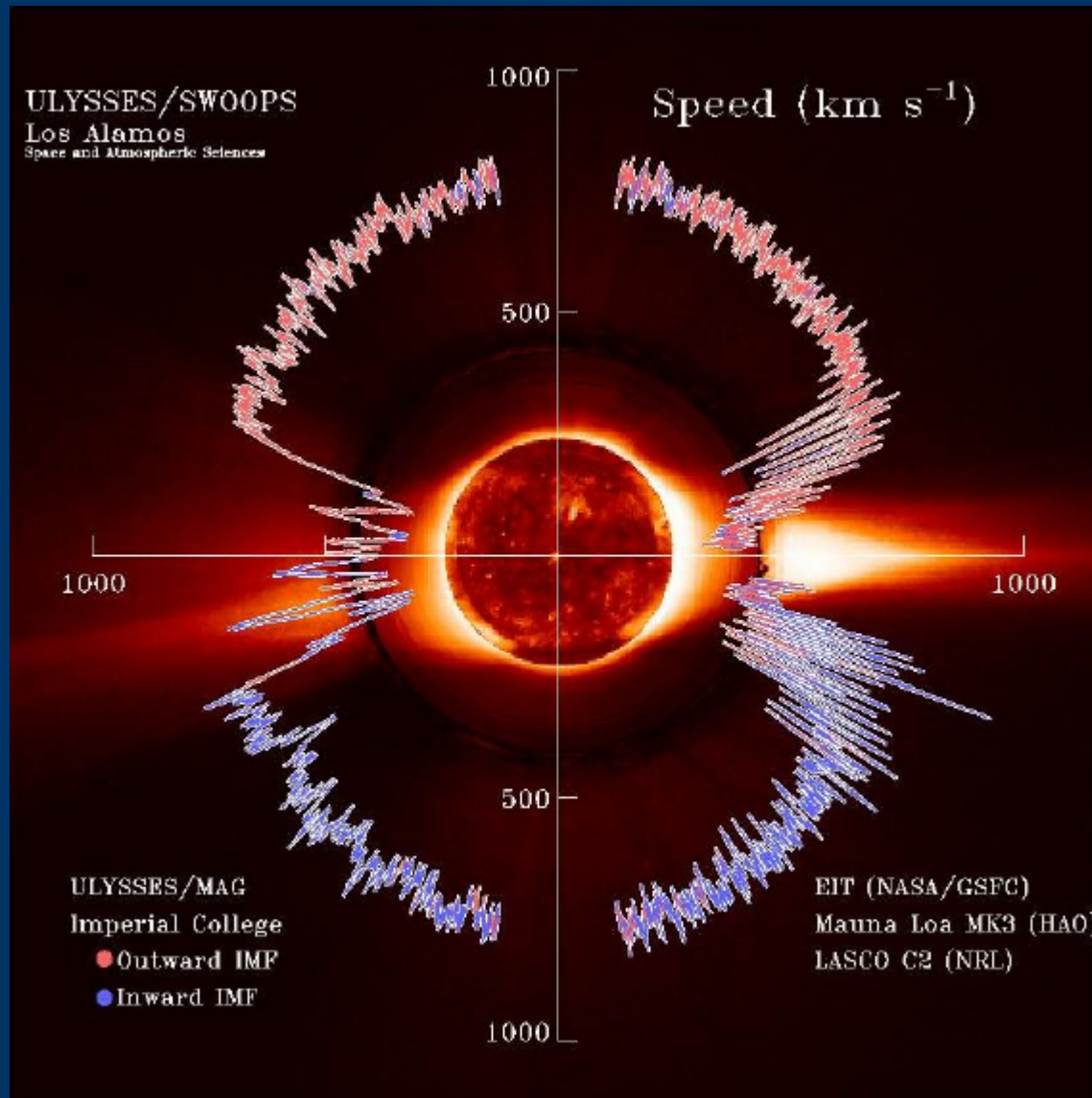


Coronal mass ejection



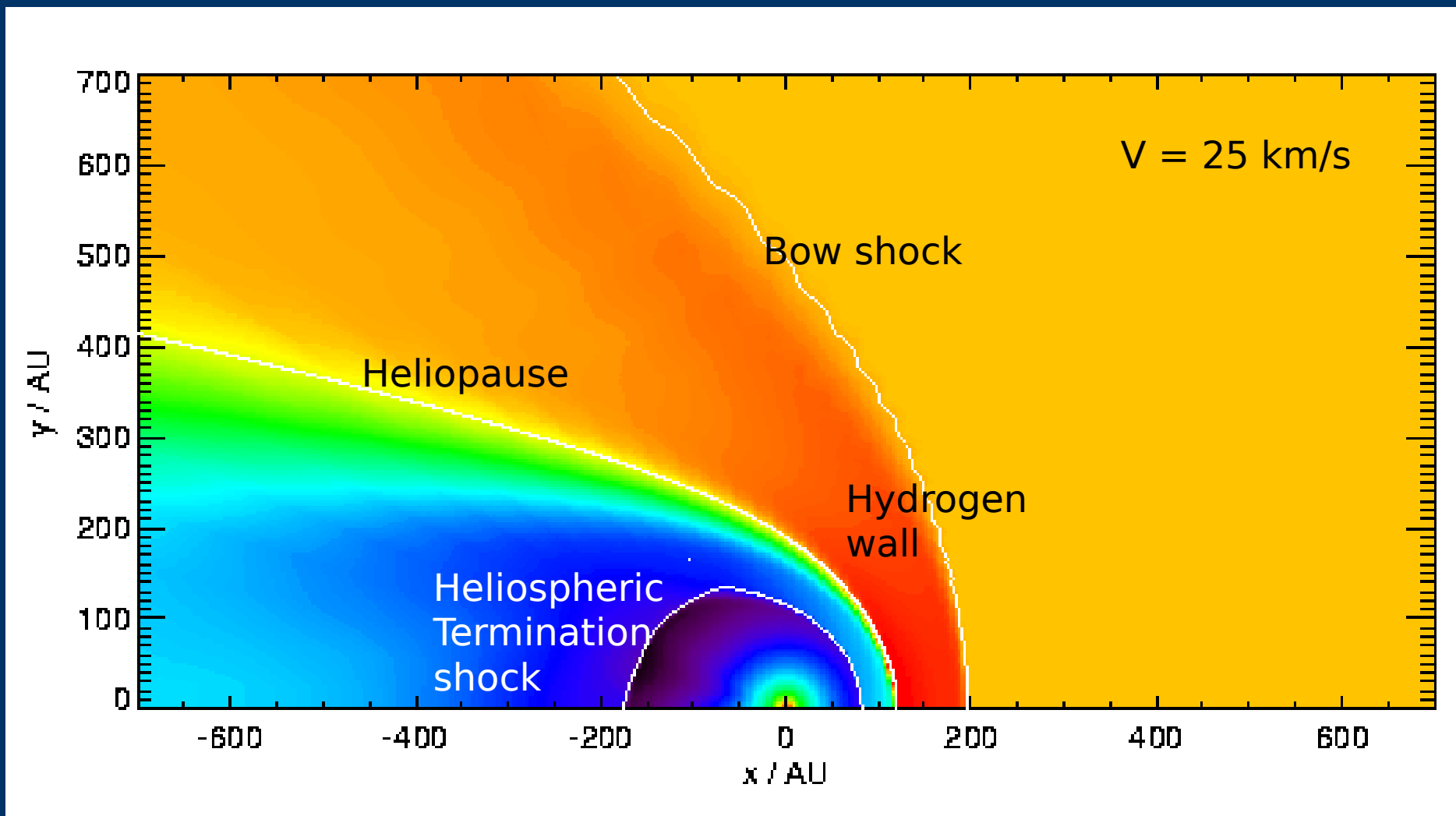
باد خورشیدی

The Solar Wind



ULYSSES + SOHO

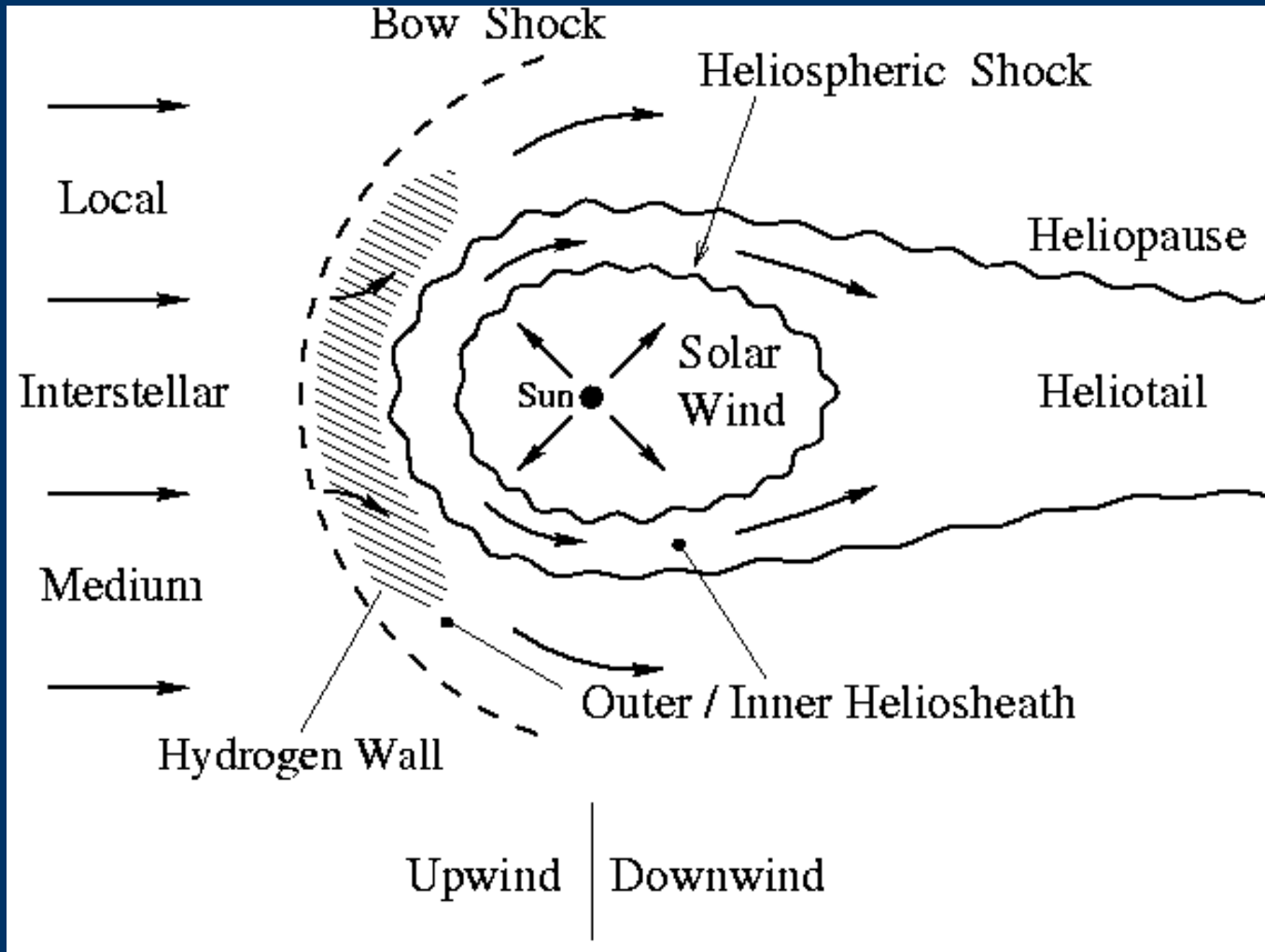
خورسپهر و محیط میان ستاره ای محلی



(red) - $0.3 > \log(n_e/\text{cm}^3) > -3.7$ (blue)

Kausch (1998)

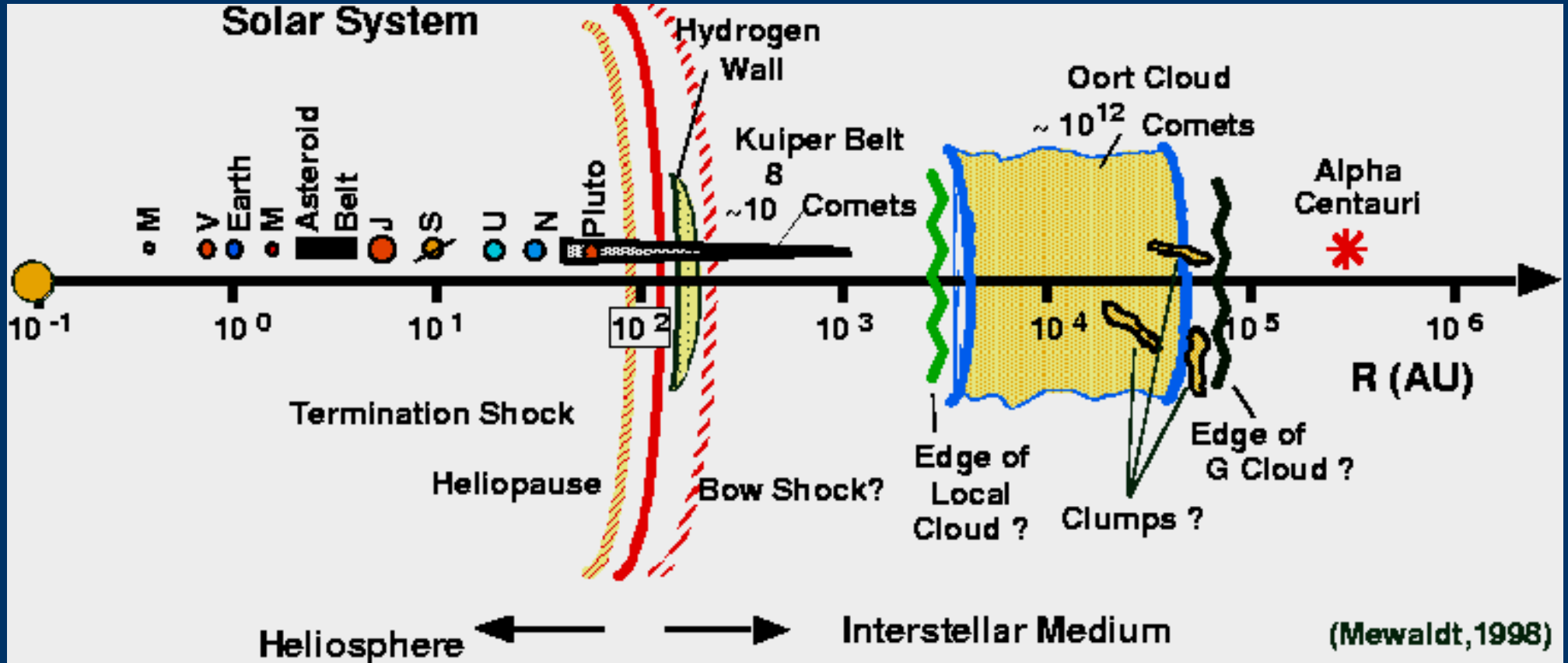
ساختار خورشید



Basic plasma motions in the restframe of the Sun

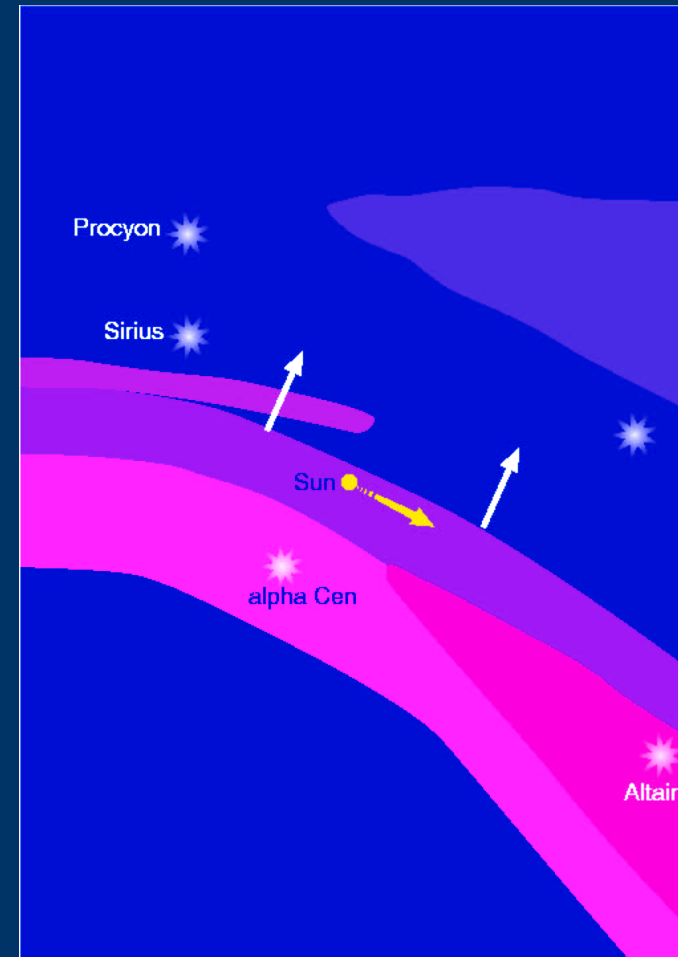
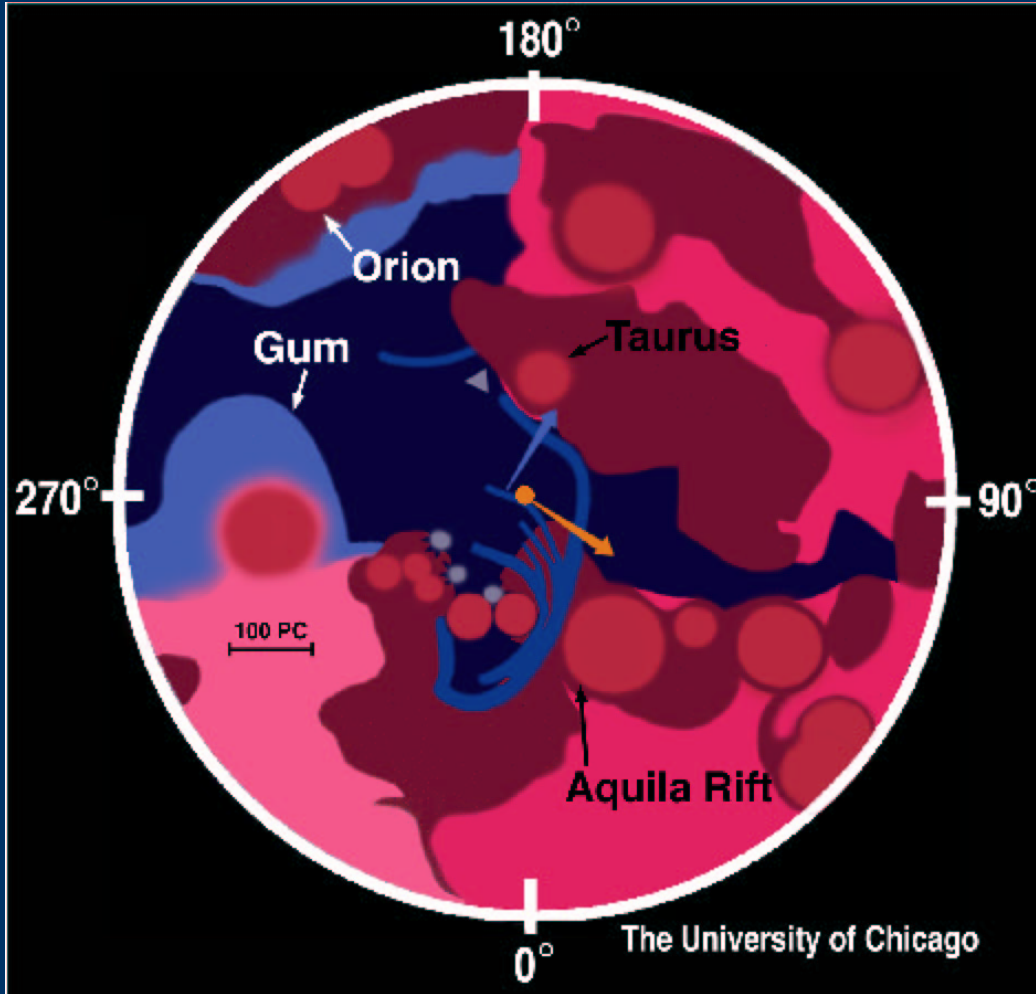
Principal surfaces (wavy lines) indicate disturbances.

محیط میان ستاره ای نزدیک



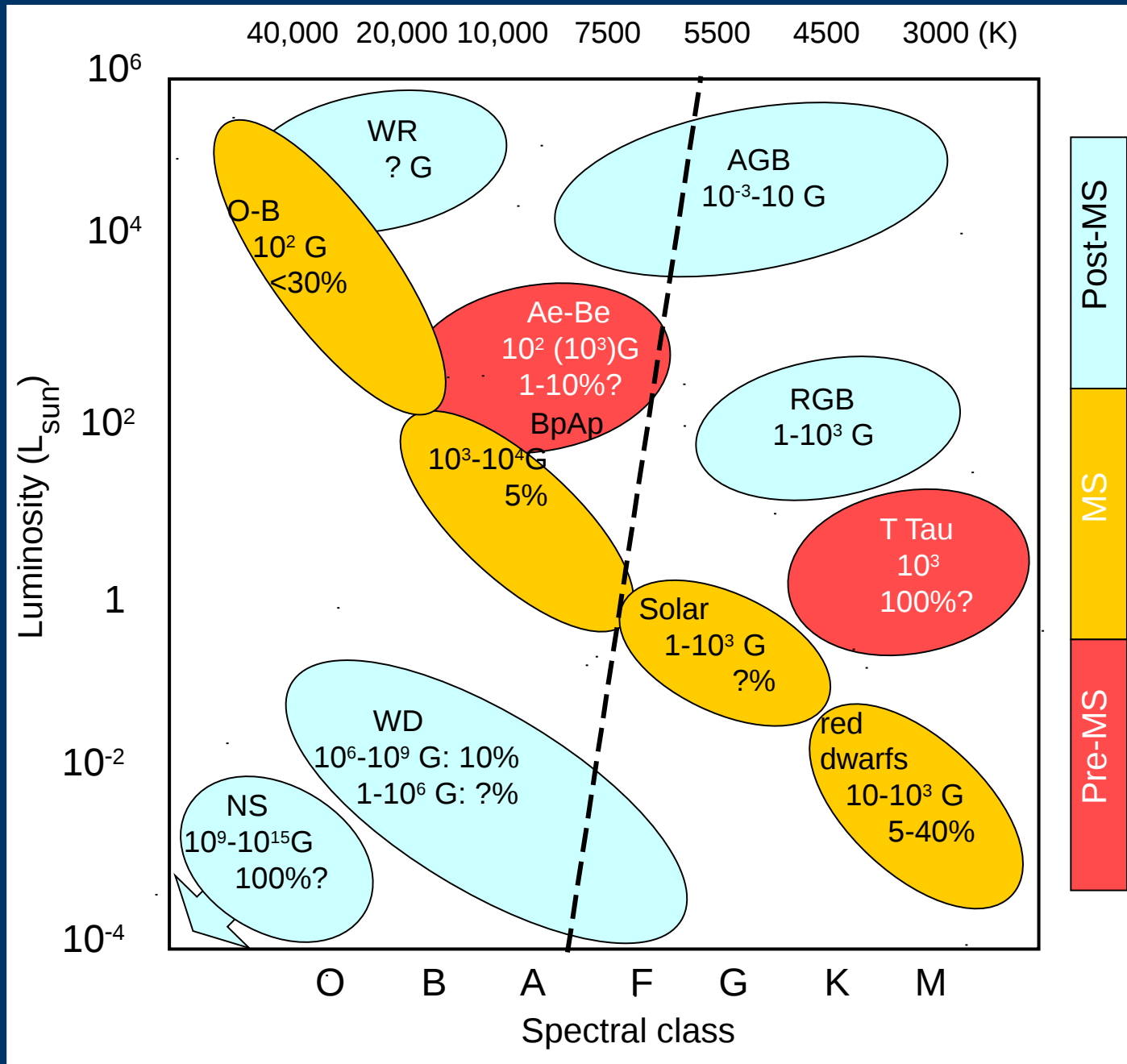
Termination shock at about 100 AU

همسایه های ما در کهکشان

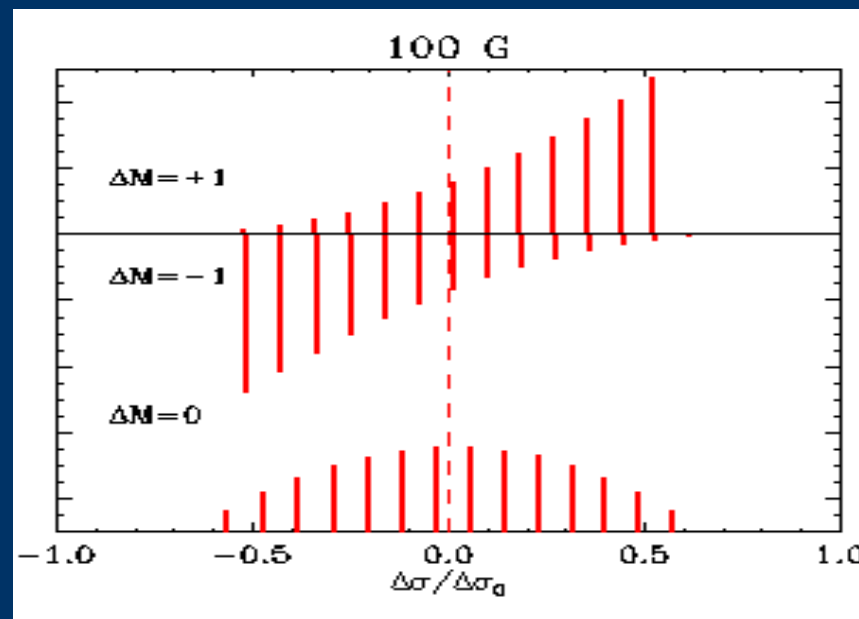
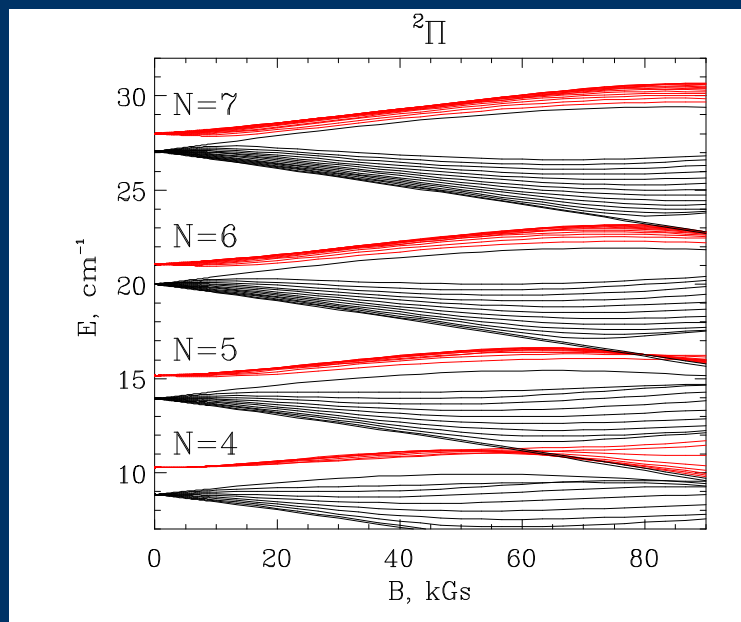


Frisch (1998)

لکه های ستاره ای در نمودار هرتزپرونگ-راسل



Molecular ZE & PBE

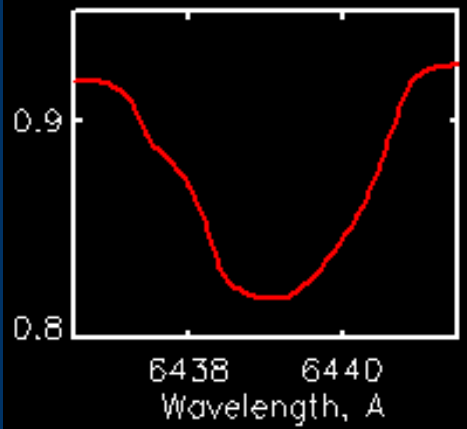
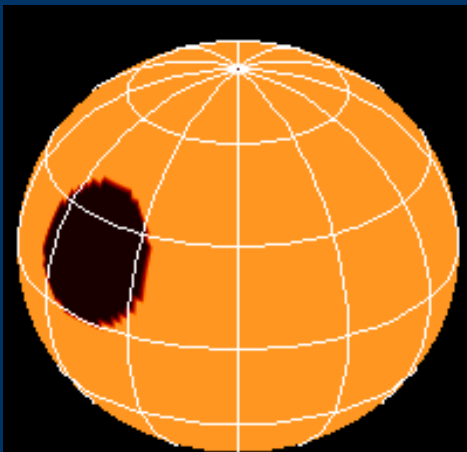


- Full theory for arbitrary molecular electronic states
 - Zeeman and Paschen-Back effects
 - FeH semi-empirical Hamiltonian
 - Scattering & Hanle effect

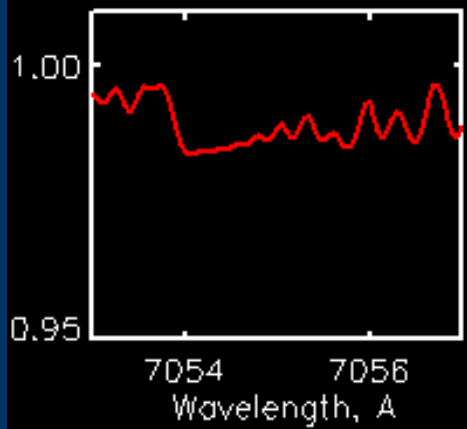
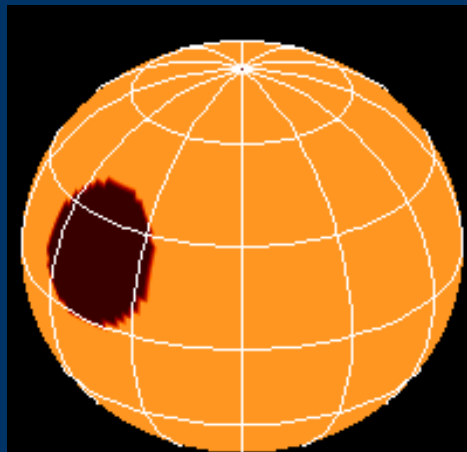
Zeeman-Doppler imaging

Doppler Imaging

Atomic lines

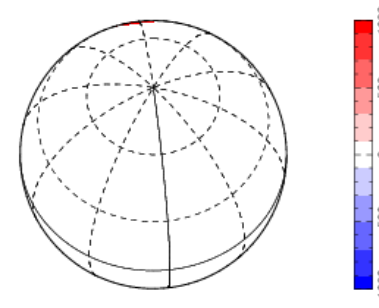


Molecular lines

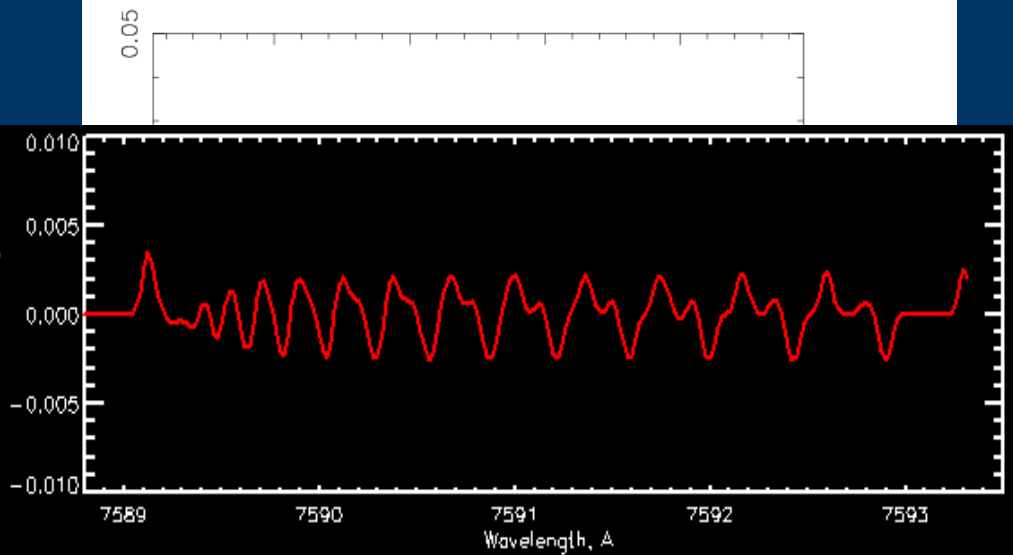


Zeeman-Doppler Imaging

Radial magnetic field



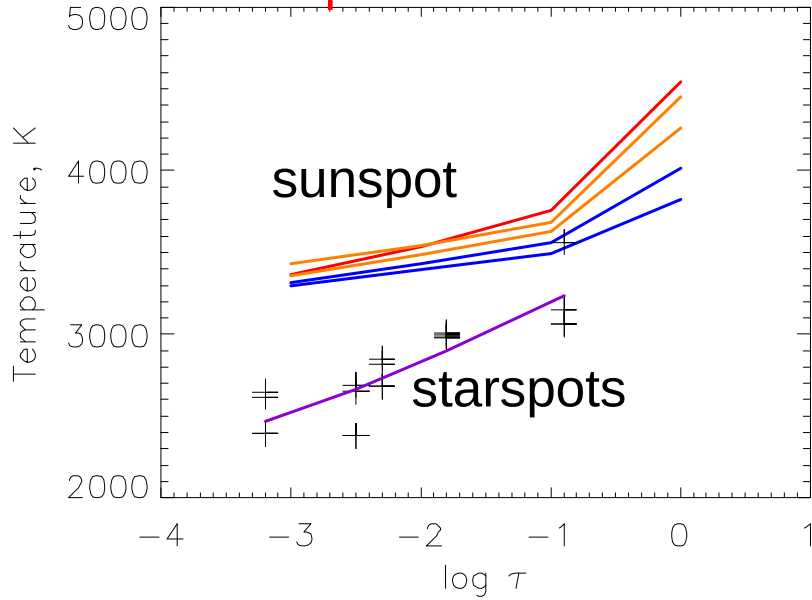
Stokes V profile



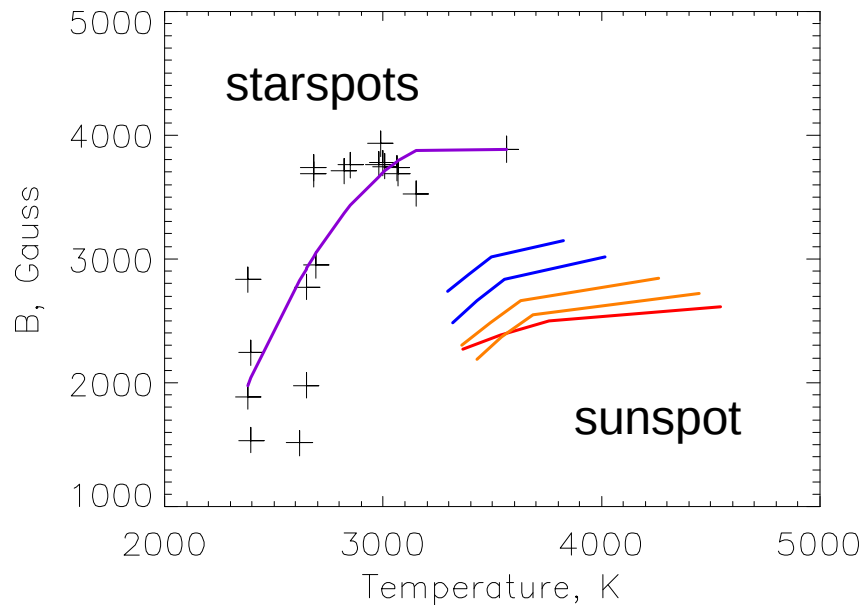
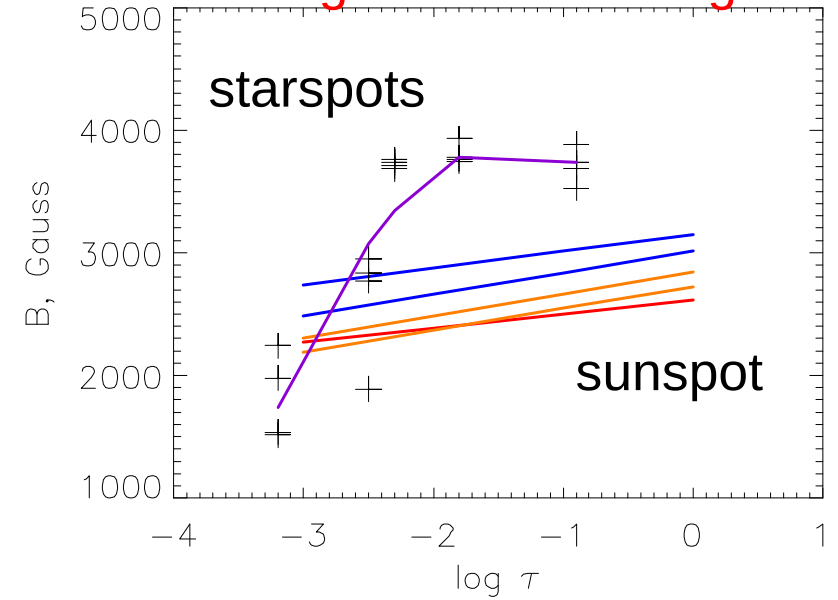
(P. Petit)

مقایسه دما و میدان مغناطیسی در لکه های خورشید و ستاره ها

Temperature



Magnetic field strength



- Penumbral edge
- Umbral dots
- Dark core

Berdyugina et al. (2009)