

Workshop projektu Se Sluncem společně

Slunce a jeho pozorování – II

20. – 22. září 2013, Hvězdárna Valašské Meziříčí



**PROGRAM
CEZHRANIČNEJ
SPOLUPRÁCE**
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



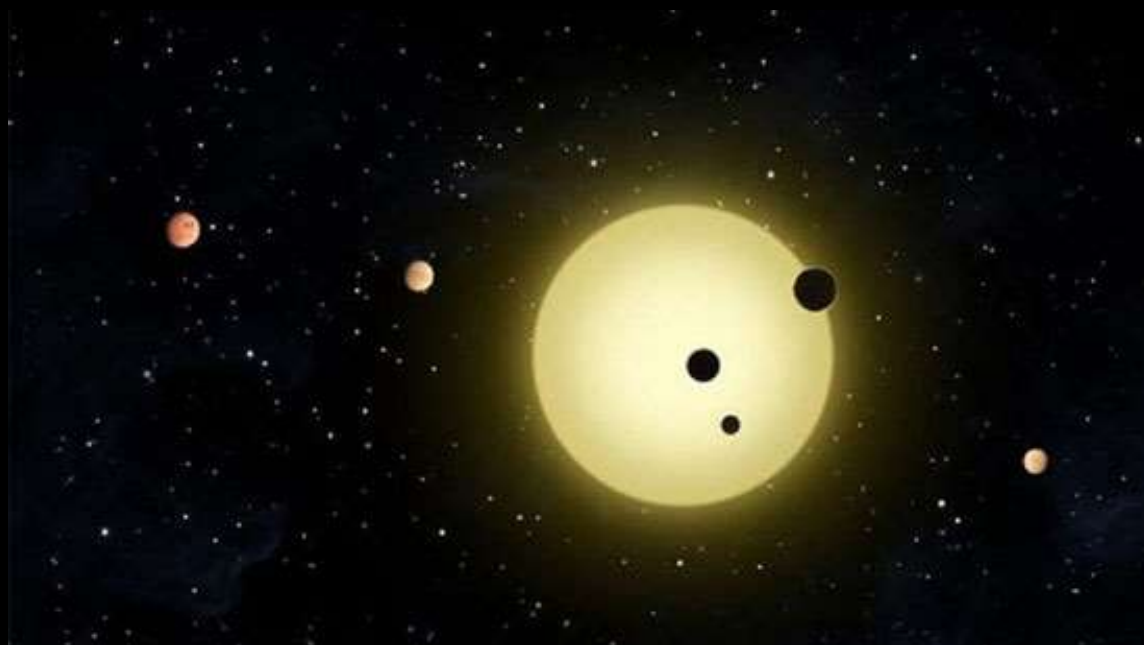
**EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA**
SPOLOČNE BEZ HRANÍC



FOND MIKROPROJEKTŮ



A teraz o niečom
úplne inom ...



Hviezdni dvojníci Slnka

Július Koza, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica



O čom bude reč

- o hviezdach nápadne podobných Slnku
- klasifikácia* podľa miery podobnosti:
 - hviezda slnečného typu
 - slnečný analóg
 - slnečné dvojča = najpodobnejšie Slnku
 - „habstar“ (Margaret Turnbull)

habitability = obývateľnosť

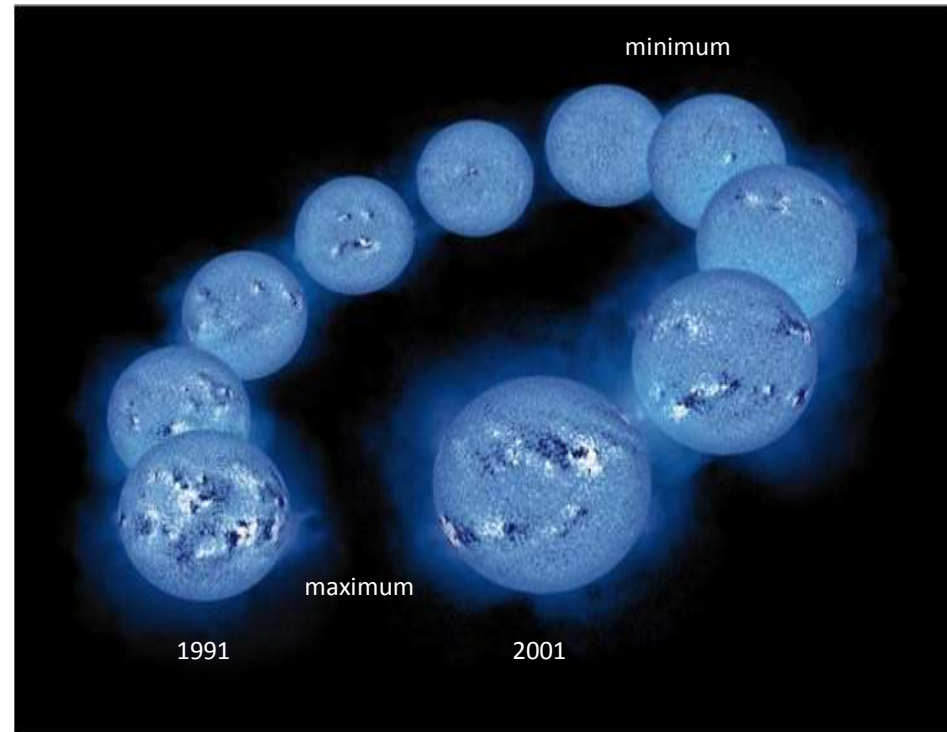
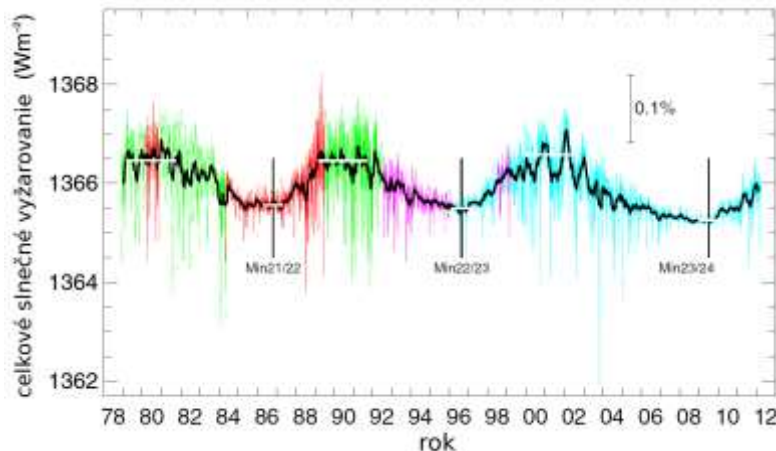
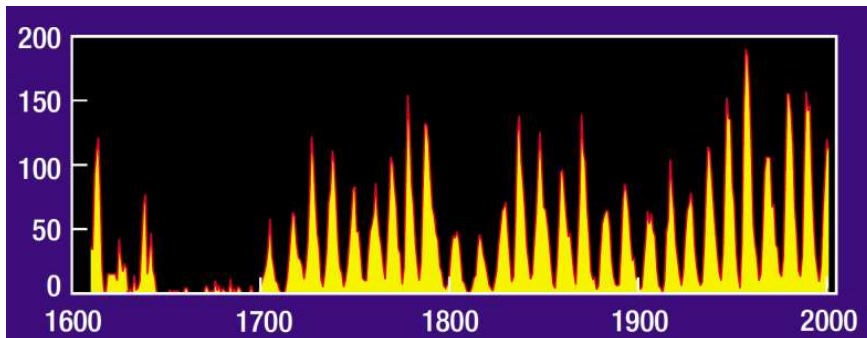
* Cayrel de Strobel, G.:

The Astronomy and Astrophysics Review,
Volume 7, Issue 3, pp. 243-288 (1996).



Prečo je to dôležité

- riešenie problémov:
 - slnečného magnetického dynama
 - periodicity slnečnej aktivity
- hľadanie obývateľných planét v obývateľných zónach okolo „habhviezd“



Čím sú Slnku podobné hviezdy užitočné

vek Slnka:

4 570 000 000 rokov

teleskopická éra:

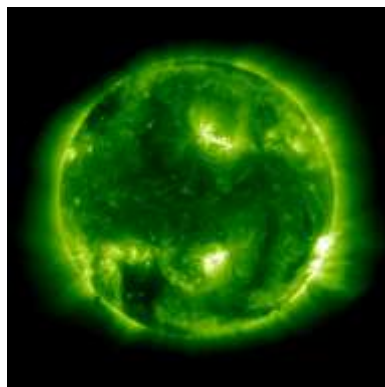
400 rokov

éra kozmického výskumu Slnka:

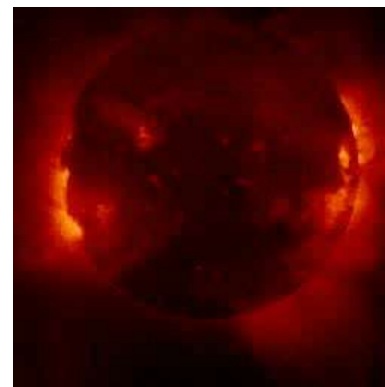
40 rokov



viditeľné svetlo
fotosférická aktivita



EUV žiarenie
prechodová vrstva



röntgenové žiarenie
koronálna aktivita



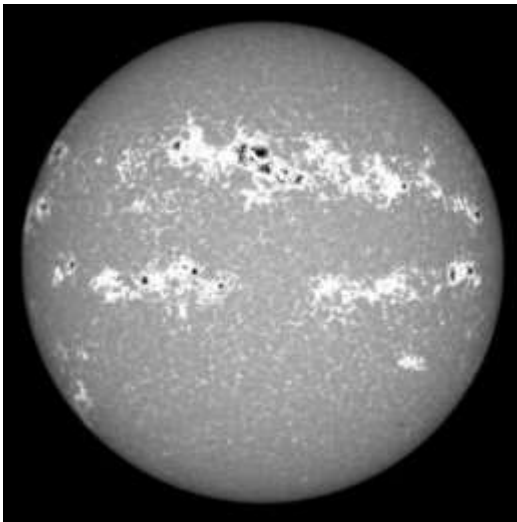
Ak by úsečka veku Slnka mala 1 m, potom **úsečka teleskopickej éry** – by mala desatinu mikrometra a mala by byť neviditeľná.



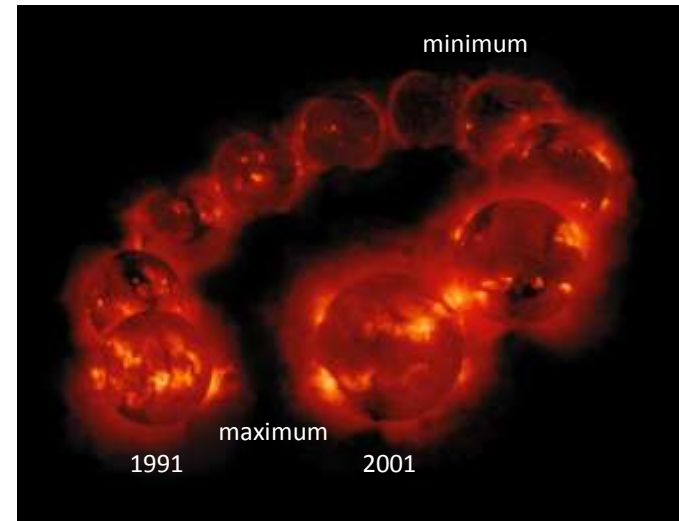
Štúdiom veľkého počtu Slnku podobných hviezd rôzneho veku poskladáme mozaiku o aktivite Slnka a činnosti jeho magnetického dynama v minulosti.

Hviezdy slnečného typu

- podobné Slnku v najširšom zmysle
 - hviezdy hlavnej postupnosti
 - farebný index B-V 0,48 – 0,8 (Slnko: B-V 0,65)
 - alternatívna definícia: spektrálny typ F8 V až K2 V (vyhovuje 10% hviezd)
 - významná korelácia rotačnej rýchlosti, chromosférickej (Ca II K a H emisia) a koronálnej aktivity (röntgenová emisia)
- chromosférická a koronálna aktivita je prejavom činnosti hviezdneho magnetického dynama

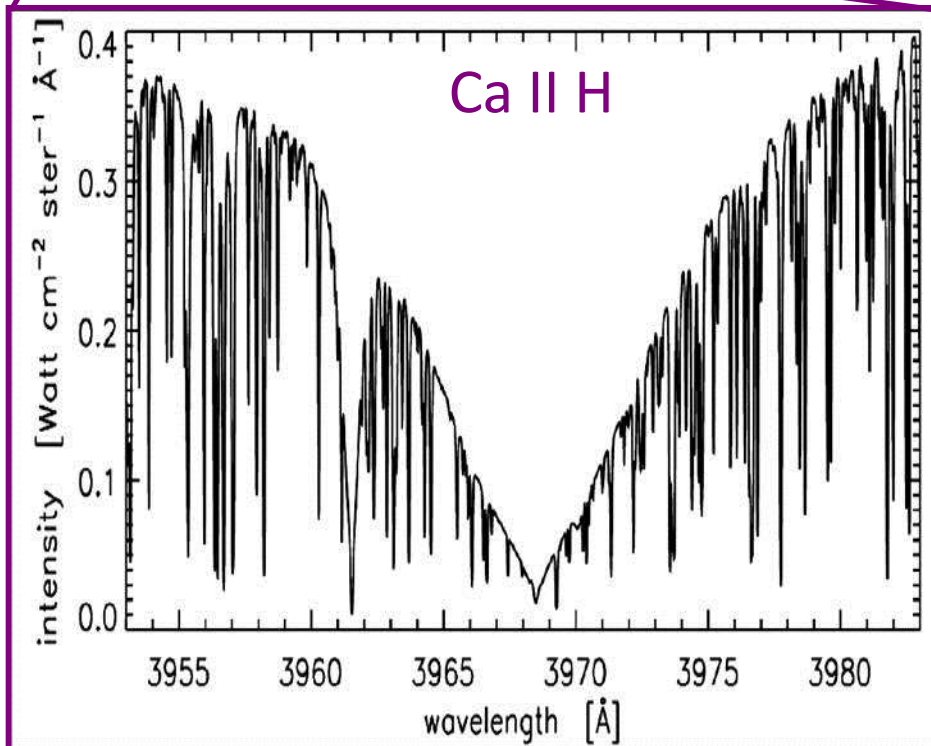
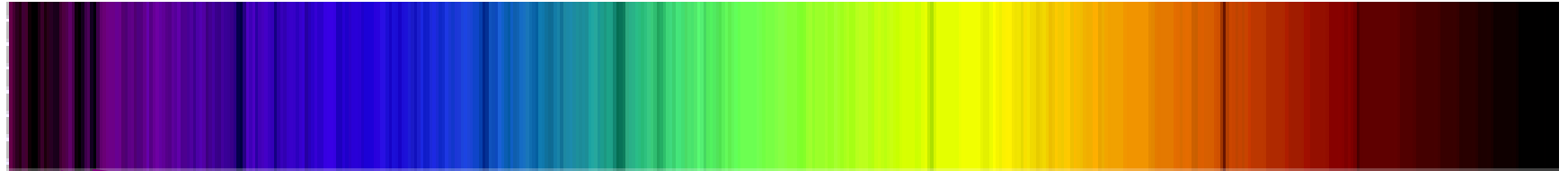


slnečná chromosféra v spektrálnej čiare Ca II K



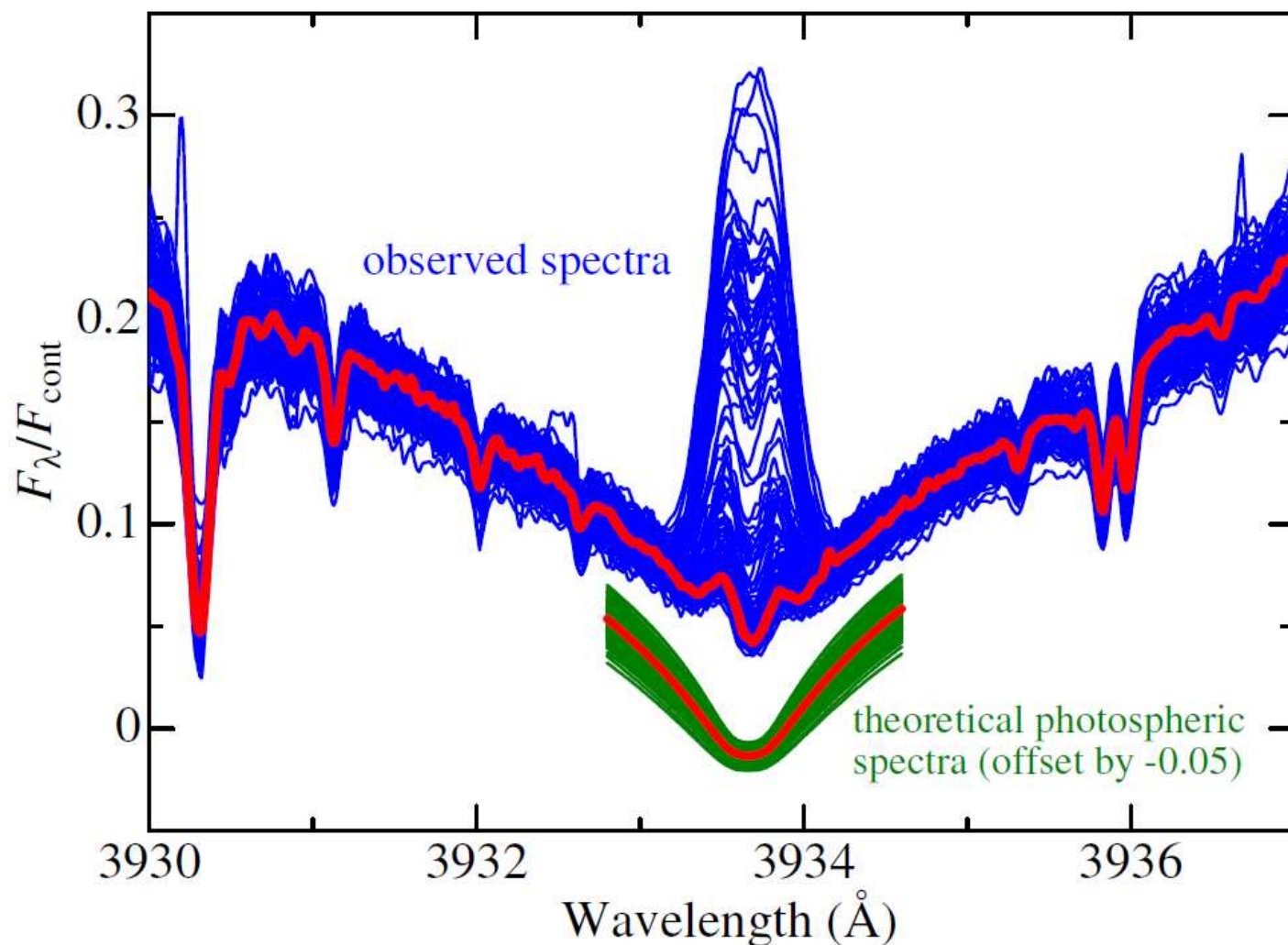
cyklus slnečnej aktivity v röntgenovom žiarení

Chromosférické spektrálne čiary Ca II K a Ca II H

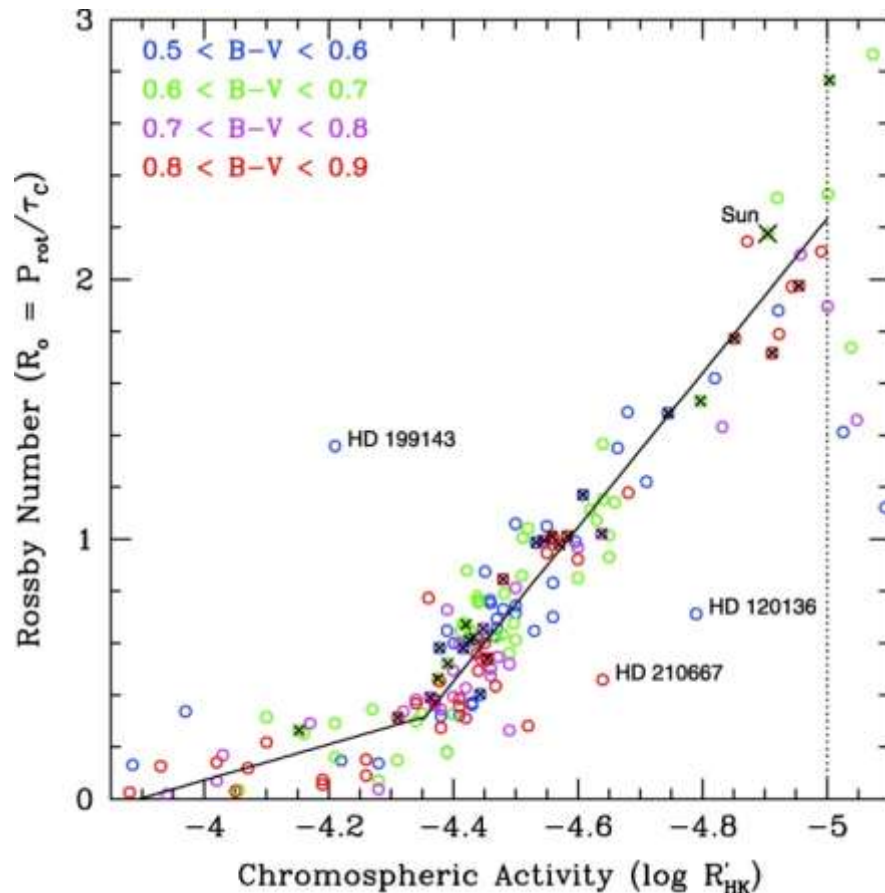


Jadrá spektrálnych čiar ionizovaného vápnika **Ca II H** a **Ca II K** sú tvorené v chromosfére.

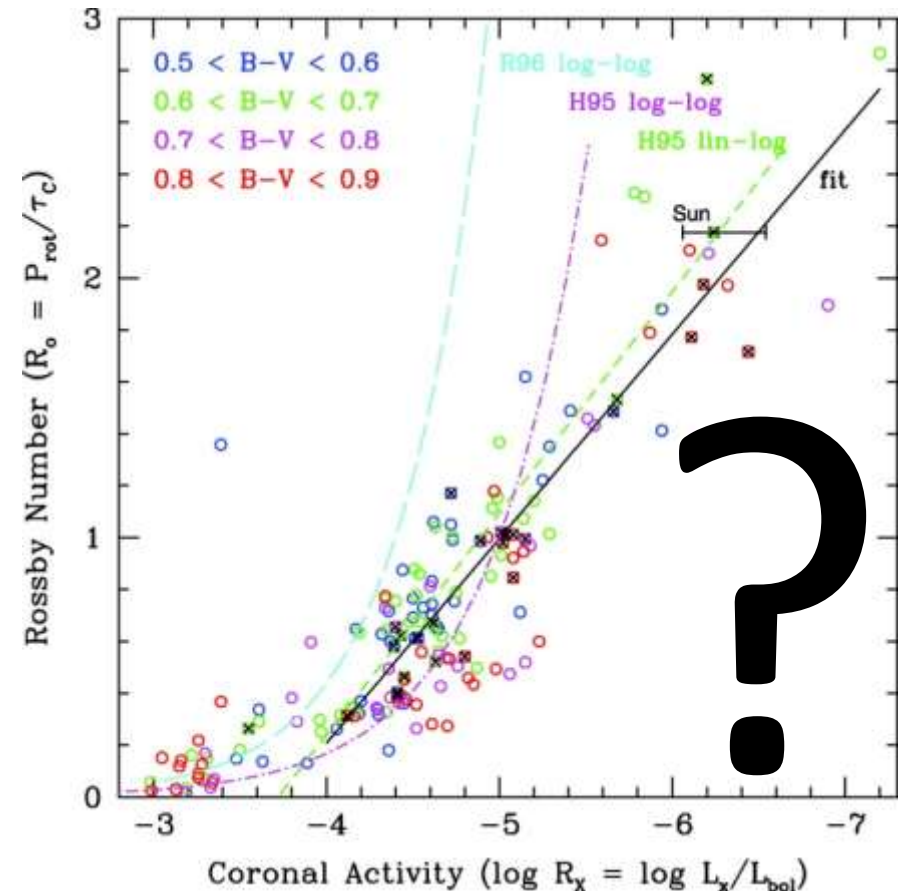
Chromosférická aktivita hviezd



Chromosférická a koronálna aktivita hviezd



R_{HK} je miera emisie v spektrálnych čiarach Ca II K a H
 Rossbyho číslo R_o vyjadruje periódu rotácie P_{rot}



R_x je miera emisie v röntgenovom žiarení

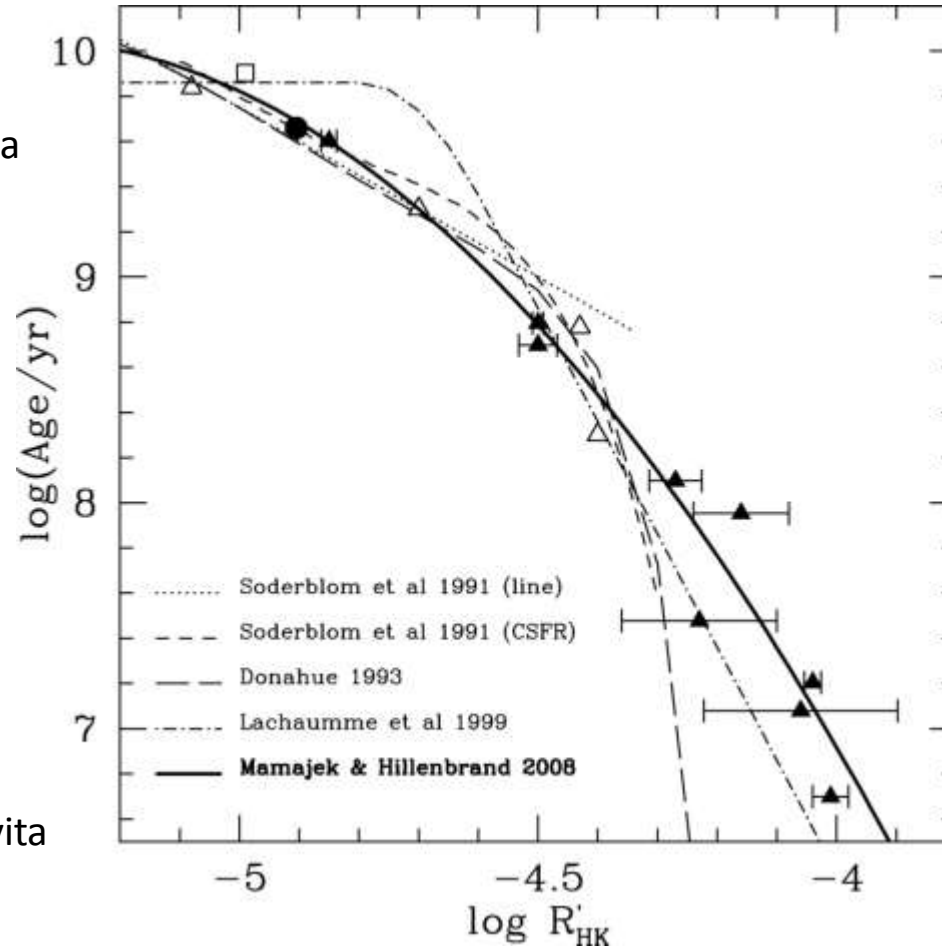
Vzťah: vek hviezdy – chromosférická aktivita

Staré hviezdy:

pomalá rotácia
nízka chromosférická aktivita

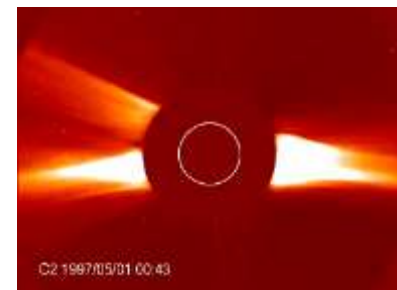
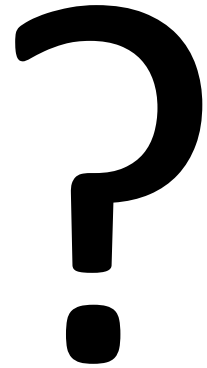
Mladé hviezdy:

rýchla rotácia
vysoká chromosférická aktivita



R_{HK} je miera emisie v spektrálnych čiarach Ca II K a H

Prečo je starnutie
hviezdy sprevádzané
spomaľovaním jej
rotácie?

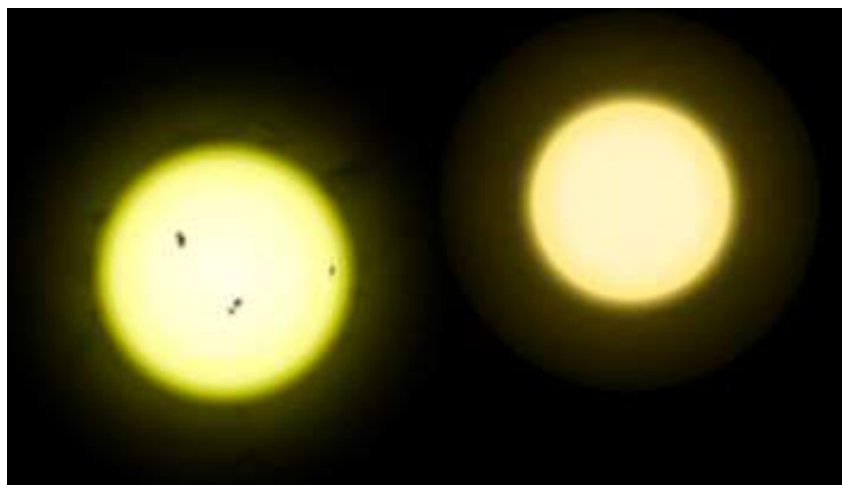


Príklady blízkych hviezd slnečného typu

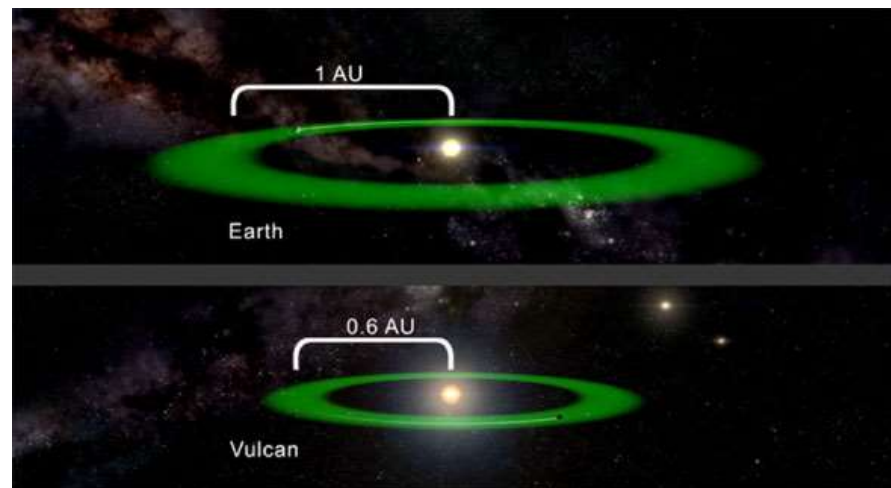
	Zdanlivá jasnosť [mag]	Vzdialenosť [ly]	Spektrálny typ	Teplota [K]	Exoplanéty
τ Ceti	3,5	12	G8 V	5 344	5
40 Eridani A (o ² Eridani)	4,4	16,5	K1 V	5 126	
82 Eridani	4,8	20	G8 V	5 338	3



SETI kandidáti



Slnko - τ Ceti



“habzóny” Slnecná sústava - 40 Eridani A

Slnečný analóg

- teplota $5778 \text{ K} \pm 500 \text{ K}$ (teda slnečná $\pm 500 \text{ K}$)
- metalicita 50 % – 200 % slnečnej
 - metalicita: obsah prvkov ťažších ako hélium v atmosfére hviezdy
- bez sekundárnej zložky s obežnou dobou kratšou ako 10 dní

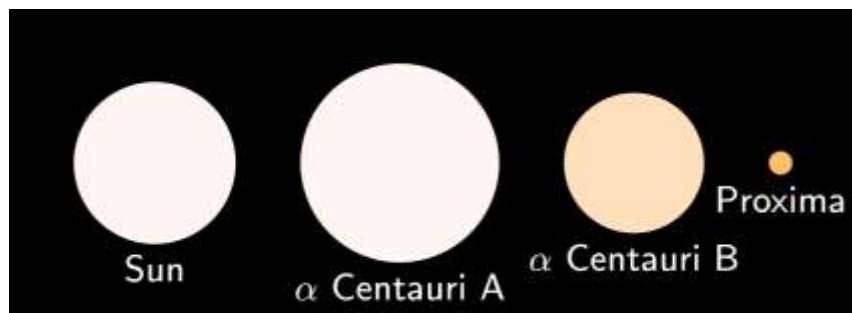
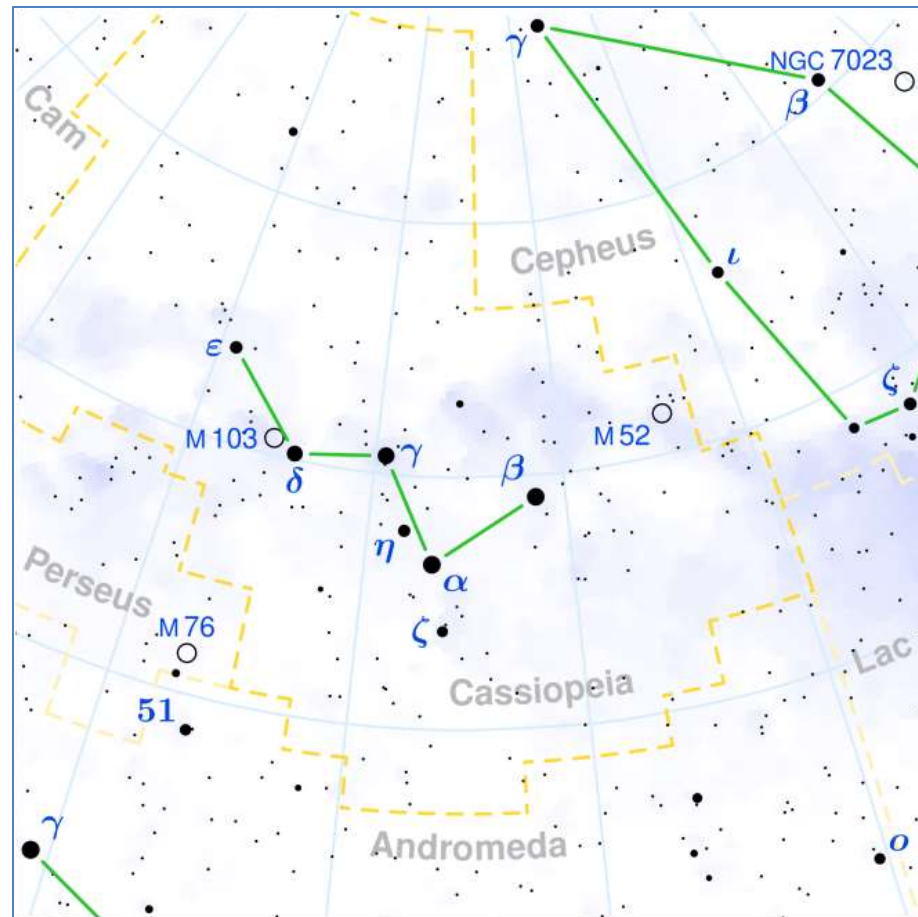
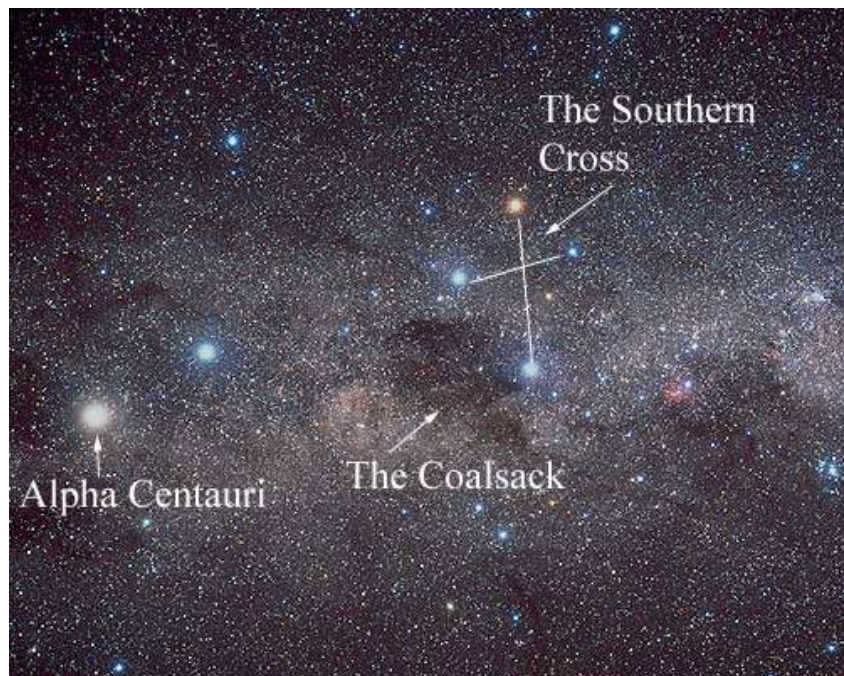
	Zdanlivá jasnosť [mag]	Vzdialenosť [ly]	Spektrálny	Teplota [K]
α Centauri A	0,0		G2 V	5 847
α Centauri B	1,3		K1 V	5 316
σ Draconis	4,7	19	K5 V	5 297
η Cassiopeiae A	3,4	19,4	G5 V	5 941

Slnečný analóg

- teplota $5778 \text{ K} \pm 500 \text{ K}$ (teda slnečná $\pm 500 \text{ K}$)
- metalicita 50 % – 200 % slnečnej
 - metalicita: obsah prvkov ťažších ako hélium v atmosfére hviezdy
- bez sekundárnej zložky s obežnou dobou kratšou ako 10 dní

	Zdanlivá jasnosť [mag]	Vzdialenosť [ly]	Spektrálny typ	Teplota [K]
α Centauri A	0,0	4,4	G2 V	5 847
α Centauri B	1,3	4,4	K1 V	5 316
σ Draconis	4,7	19	K0 V	5 297
η Cassiopeiae A	3,4	19,4	G0 V	5 941

Slné analógy na oblohe



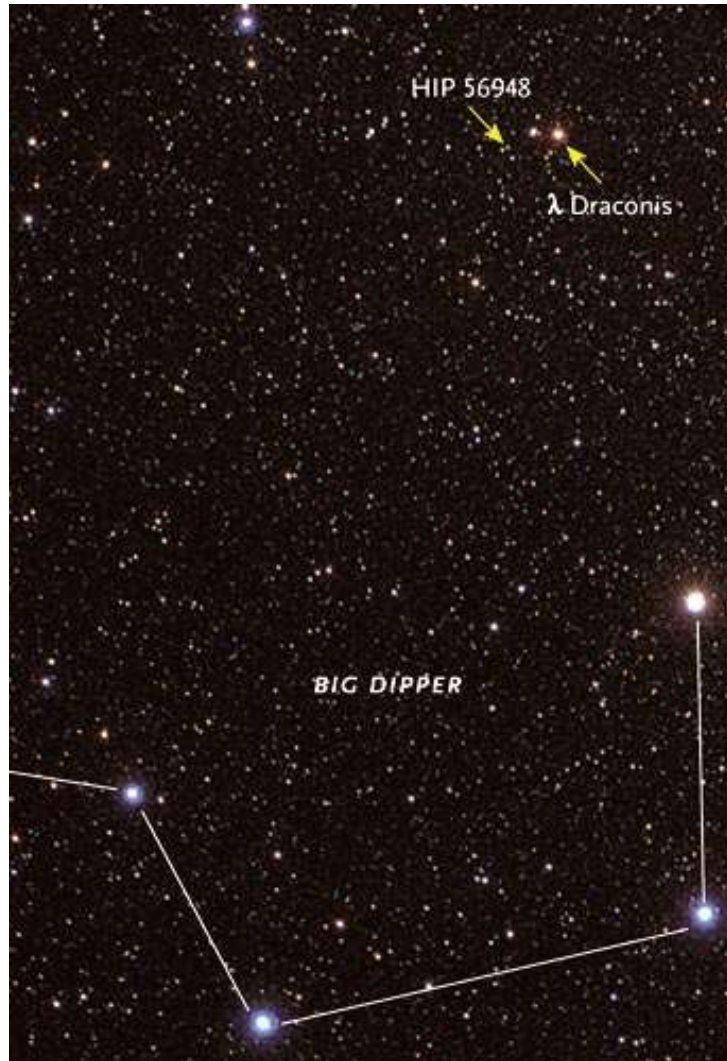
Slnečné dvojča

- teplota $5778 \text{ K} \pm 50 \text{ K}$ (slnečná $\pm 50 \text{ K}$)
- metalicita 89 % – 112 % slnečnej
- bez sekundárnej zložky
- vek $4,57 \pm 1$ miliarda rokov (slnečný ± 1 miliarda rokov)

	Zdanlivá jasnosť [mag]	Vzdialenosť [ly]	Spektrálny typ	Teplota [K]	Vek [Gyr]
18 Scorpii	5,5	45	G2 Va	5 835	4,2
HIP 56948 HD 101364 (Drak)	8,7	208	G5 V	5 795	3,5

- 18 Scorpii:
- má cyklus hviezdnej aktivity kratší o niekoľko rokov ako slnečný
 - amplitúda aktivity podobná slnečnej (t.j. variácie jasnosti 0,1 %)

Slnčné dvojča na oblohe a v súvislostiach

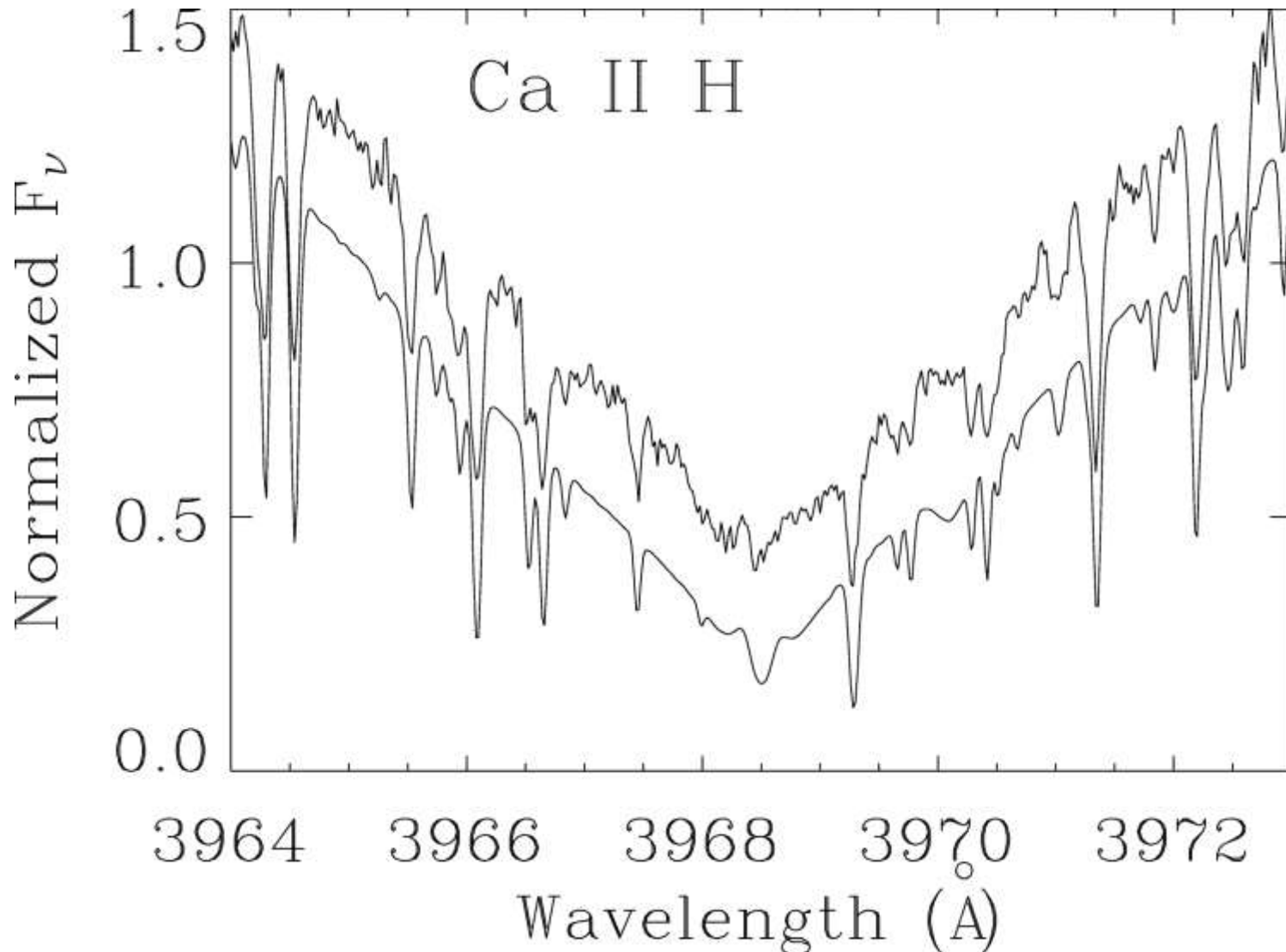


- Hľadanie slnečného dvojčata súvisí s otázkou jedinečnosti Slnka vo vesmíre a s antropocentrickým princípom.
- Je Slnko vo vesmíre jedinečné svojimi fyzikálno-chemickými vlastnosťami podmieňujúcimi vznik obývateľnej planéty?
- Má Slnko dvojníkov?
- Odpoveď: Slnko nie je výnimočné a má dvojníkov.

Habhviezdy

- habhviezda = hviezda s vlastnosťami mimoriadne priaznivými pre výskyt Zemi-podobných planét
 - vek: najmenej 3 miliardy rokov
 - hlavná postupnosť
 - premennosť menšia ako 1% (prakticky 3%)
 - bez podvojnosti
 - schopnosť mať terestrické planéty
 - dynamicky stabilná obývateľná zóna (habzóna)
 - príklad habhviezdy: HD 70642
 - takmer slnečné dvojča
 - exojupiter ($m = 2 M_J$, $a = 3,23 \text{ AU}$, $P = 6 \text{ rokov}$) zabezpečuje stabilitu obývateľnej zóny vo vzdialenosti 1 AU

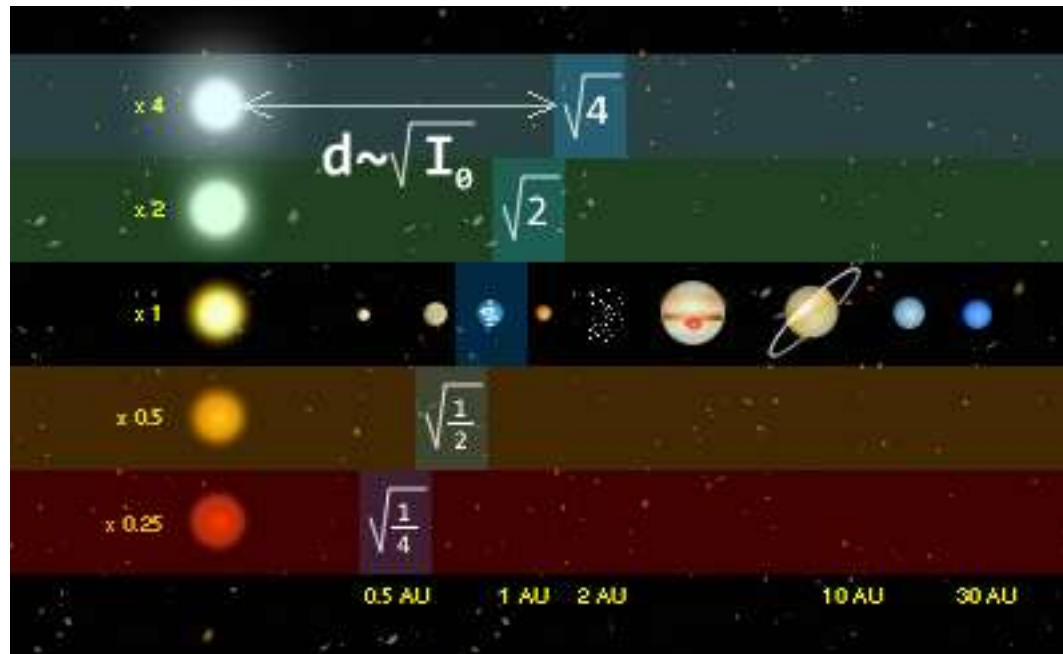
Ktorý profil patrí habviezde a ktorý Slnku?



?

Obývateľná zóna

Prstencová oblasť okolo hviezdy, v ktorej sa môže na planetárnych objektoch s **dostatočným tlakom atmosféry** vyskytovať **tečúca voda**.



Kritika koncepcie obývateľných zón, mesiace veľkých planét.

Európa – možný podpovrchový oceán tekutej vody

Titan – metánové jazerá ako prostredie vhodné pre život

Habkatalóg

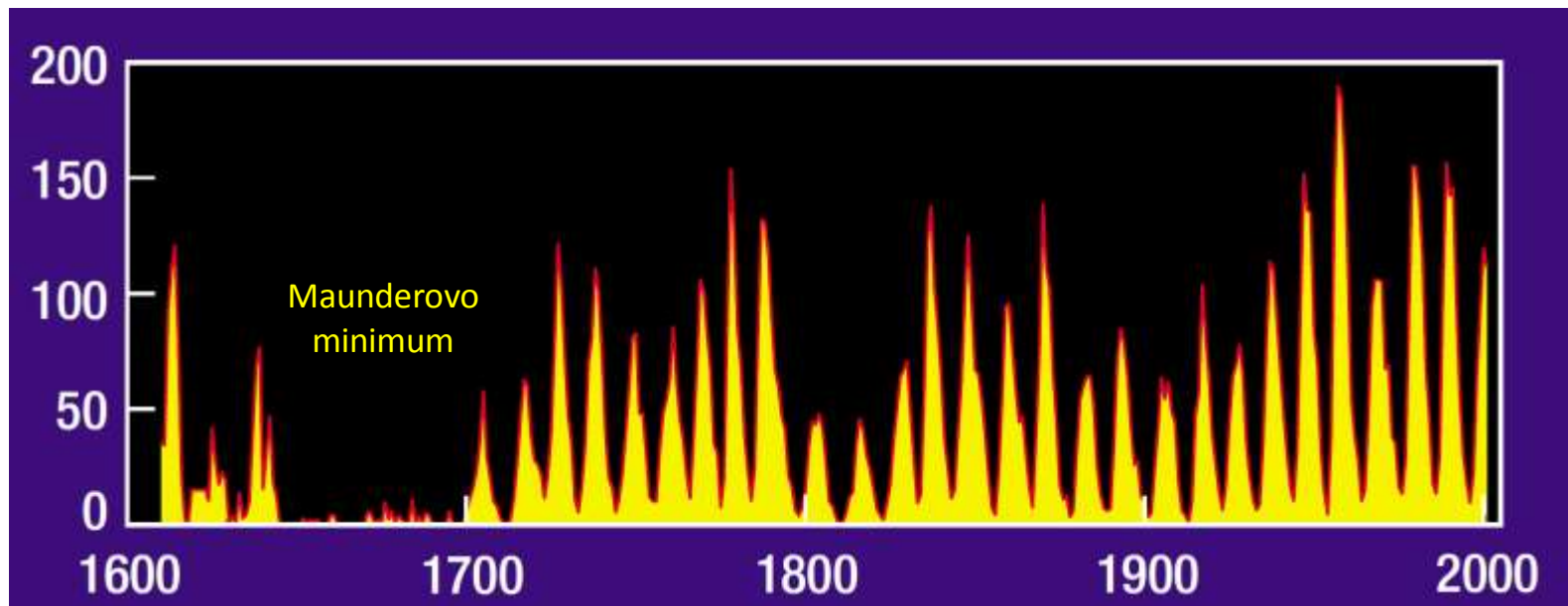
- katalóg 17 129 habhviezd (75% bližšie ako 140 pc) pre potreby projektu SETI (Search for ExtraTerrestrial Intelligence)
- autori: Margaret Turnbull, Jill Tarter (SETI)
- medzi TOP habviezdami habkatalógu sú napr.: β CVn, 18 Sco, 51 Peg



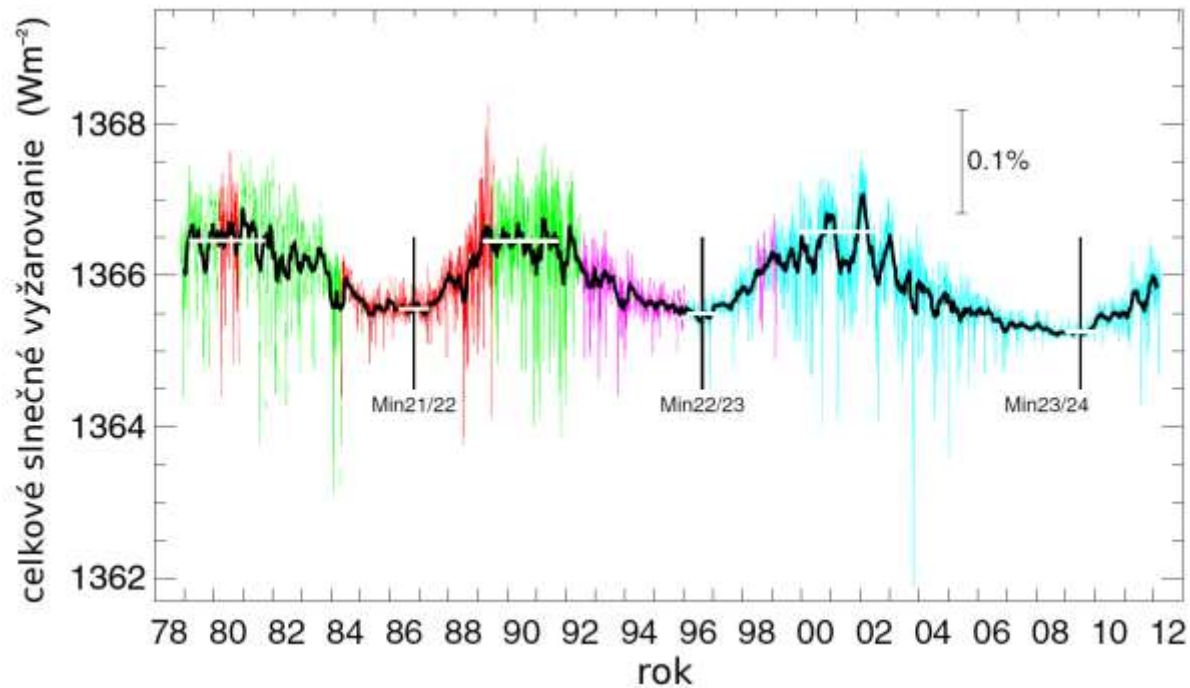
Allen Telescope Array

Aktivita Slnku podobných hviezd – kľúč k pochopeniu vývoja (a) aktivity Slnka

- lepšie pochopenie slnečnej aktivity štúdiom Slnku podobných hviezd
- pozorovaním veľkého počtu Slnku podobných hviezd je možné pochopiť dlhodobú aktivitu Slnka
- Maunderovo minimum 1645 – 1715
- malá doba ľadová v Európe
- rovnaké ochladenie aj vulkanizmom

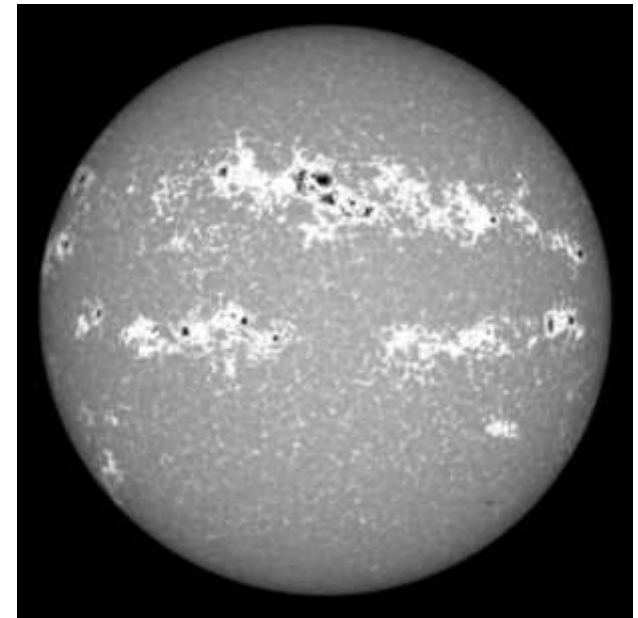


Fotometrická variabilita jasnosti fotosféry Slnka ako hviezdy



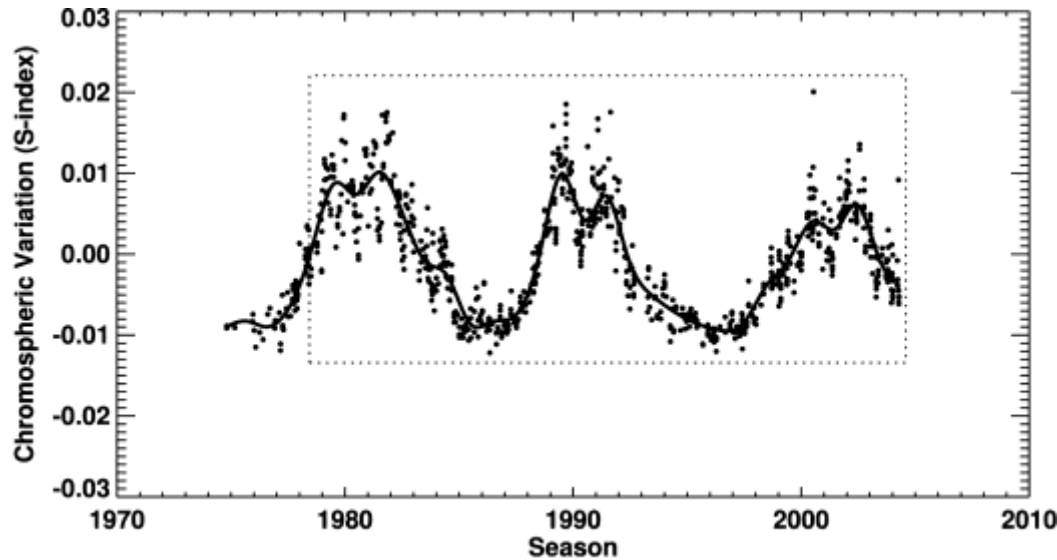
fotometrický index $(b+y)/2$

Spektrálna variabilita jasnosti chromosféry Slnka ako hviezdy



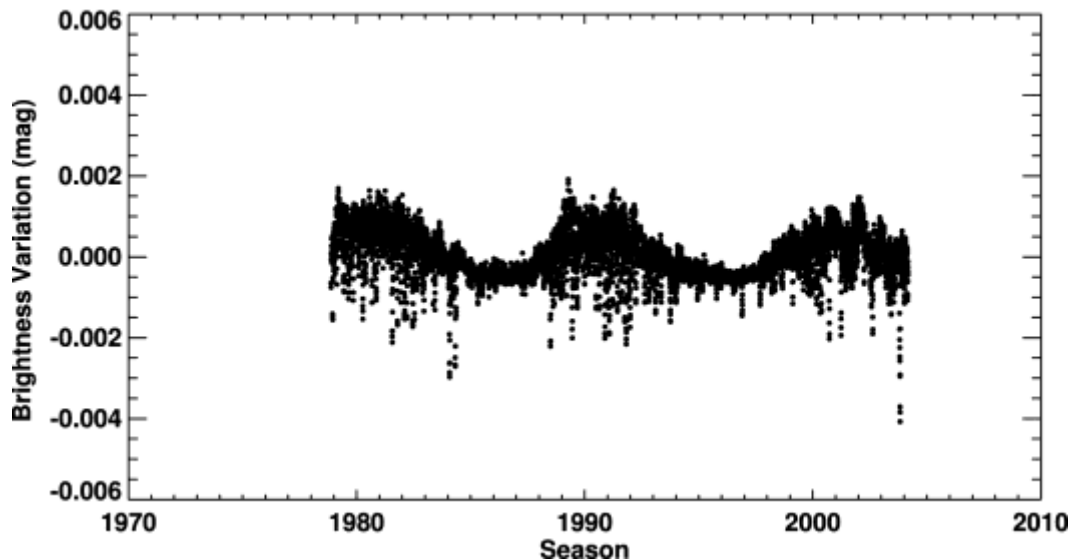
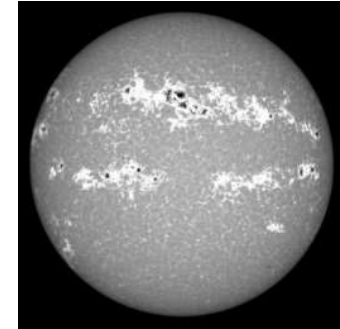
spektrálne indexy S a $\log R_{HK}$
vzťahujúce sa k spektrálnym
čiarám Ca II K a H

Aktivita a variabilita Slnka ako hviezd



Chromosférická Ca II K aktivita:

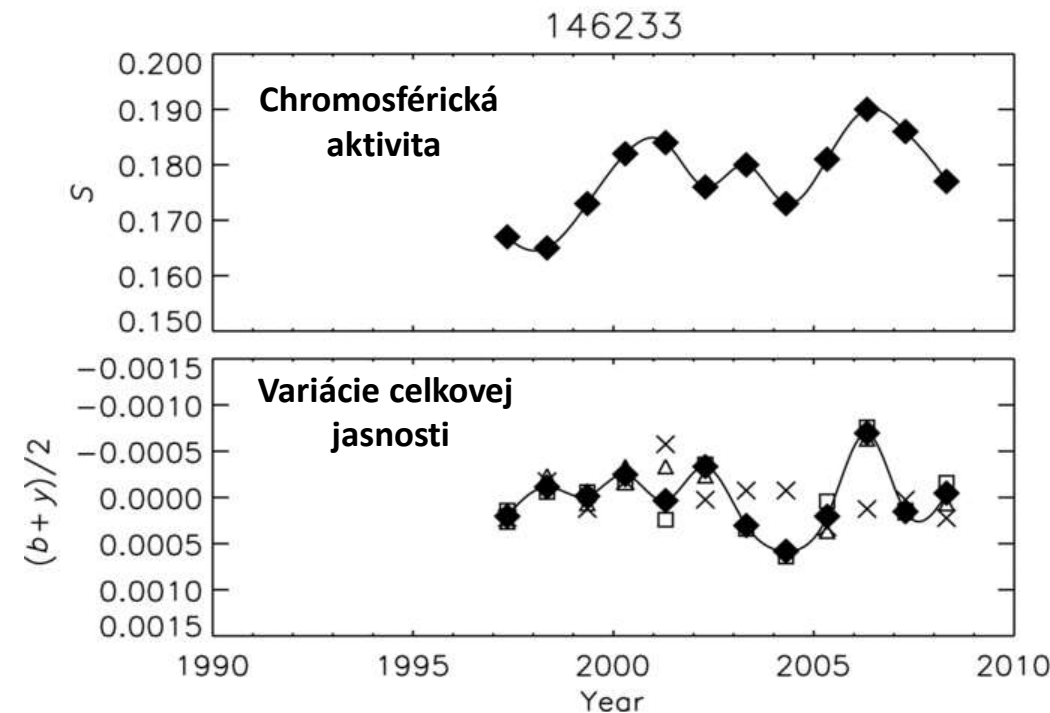
- výrazná
- vo fáze s variáciami jasnosti



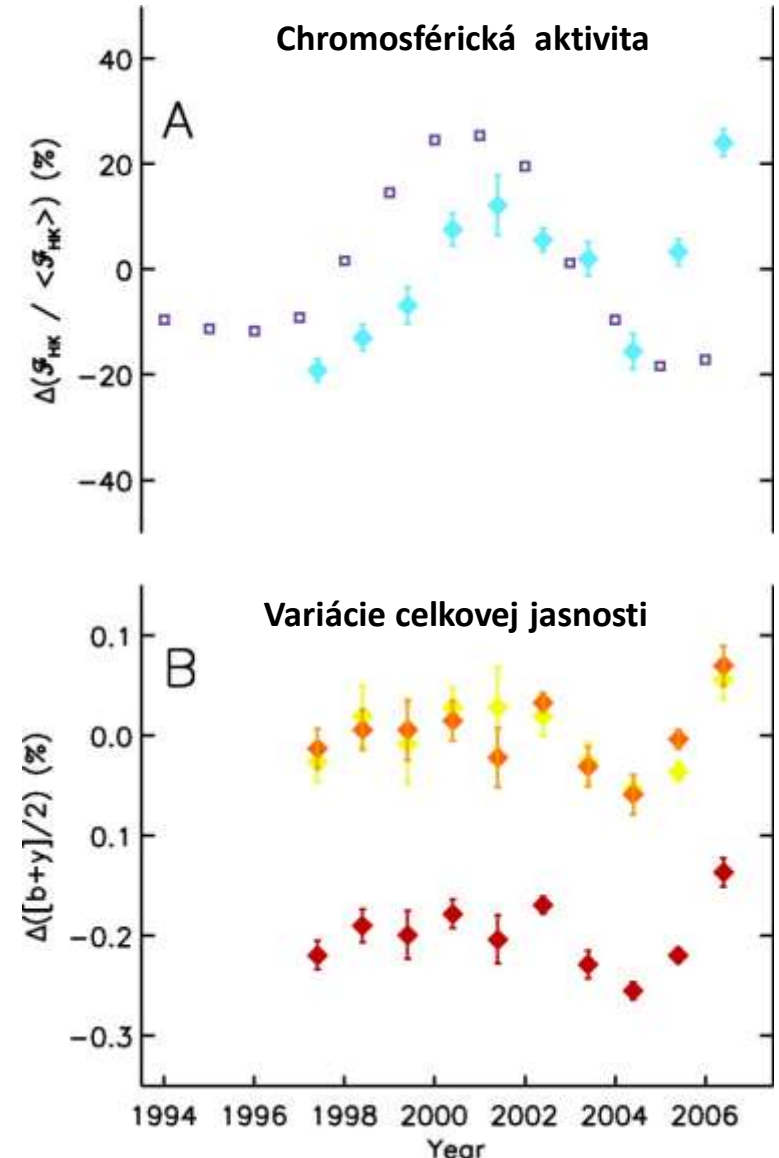
Variácie celkovej jasnosti:

- vo fáze s magnetickým cyklom (Wolfovým číslom)
- kváziperiodické s periódou 8 – 14 rokov (typicky 11 rokov)
- na úrovni $\pm 0,1\%$ ($\pm 0,001$ mag)

Aktivita a variabilita slnečného dvojčata 18 Scorpii



- periodicita aktivity ~ 7 rokov
- fotometrická variabilita podobná Slnku
- zjavná pozitívna korelácia aktivita – jasnosť **spochybnená** novšími meraniami

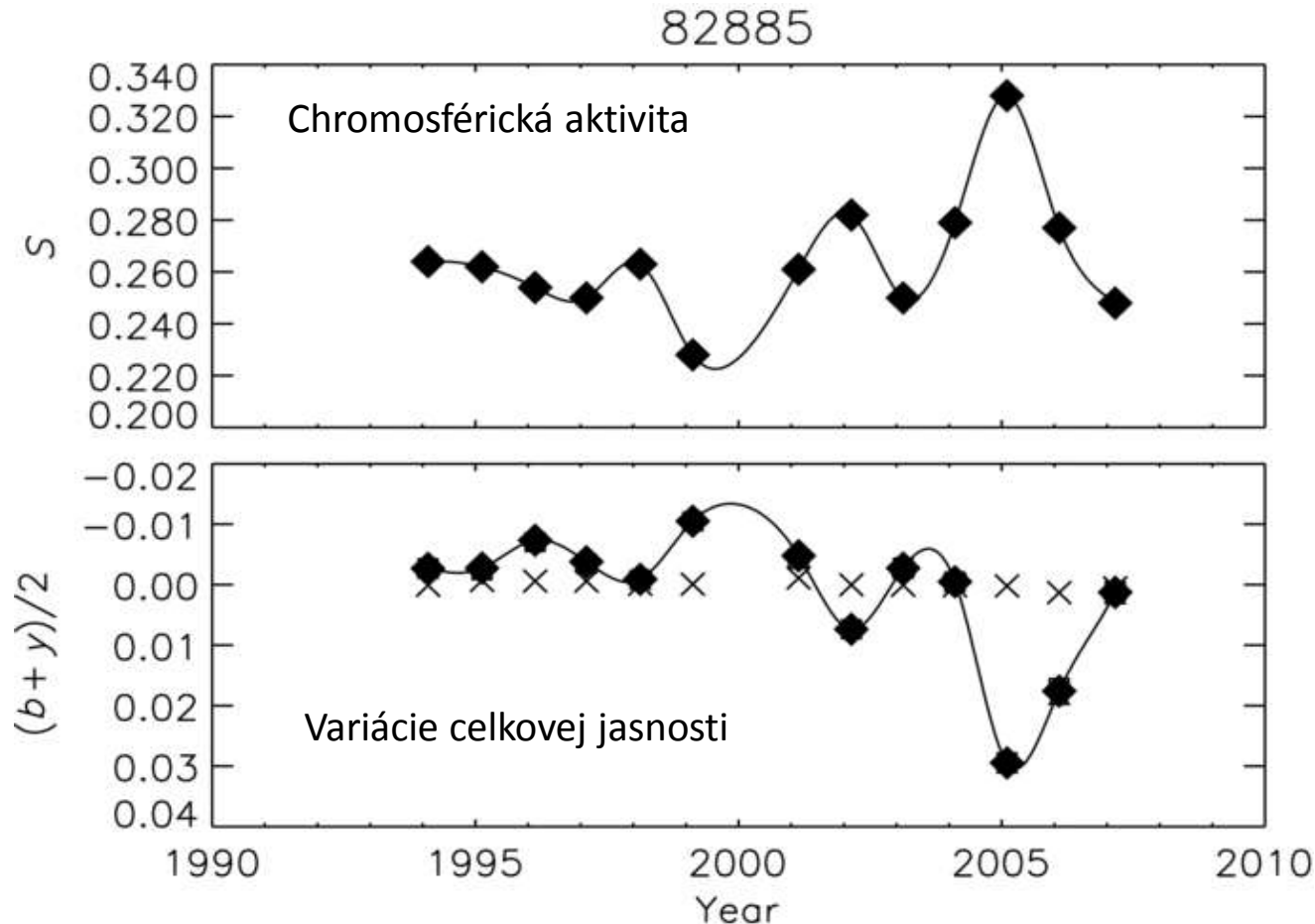


[Hall a kol.: The Astronomical Journal, Volume 133, Issue 5, pp. 2206-2208 \(2007\).](#)

[Hall a kol.: The Astronomical Journal, Volume 138, Issue 1, pp. 312-322 \(2009\).](#)

Aktivita a variabilita Slnku podobných hviezd

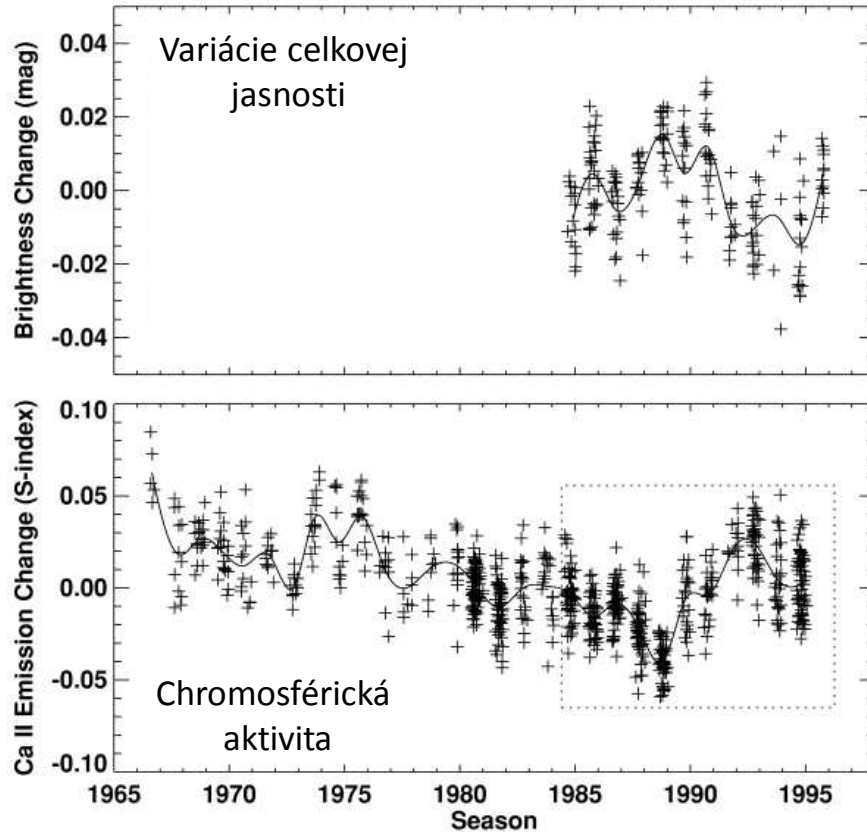
spektrálny typ: G8 IV – V



- neperiodické variácie
- takmer perfektná **antikorelácia** aktivita - jasnosť!!!

Aktivita a variabilita Slnku podobných hviezd

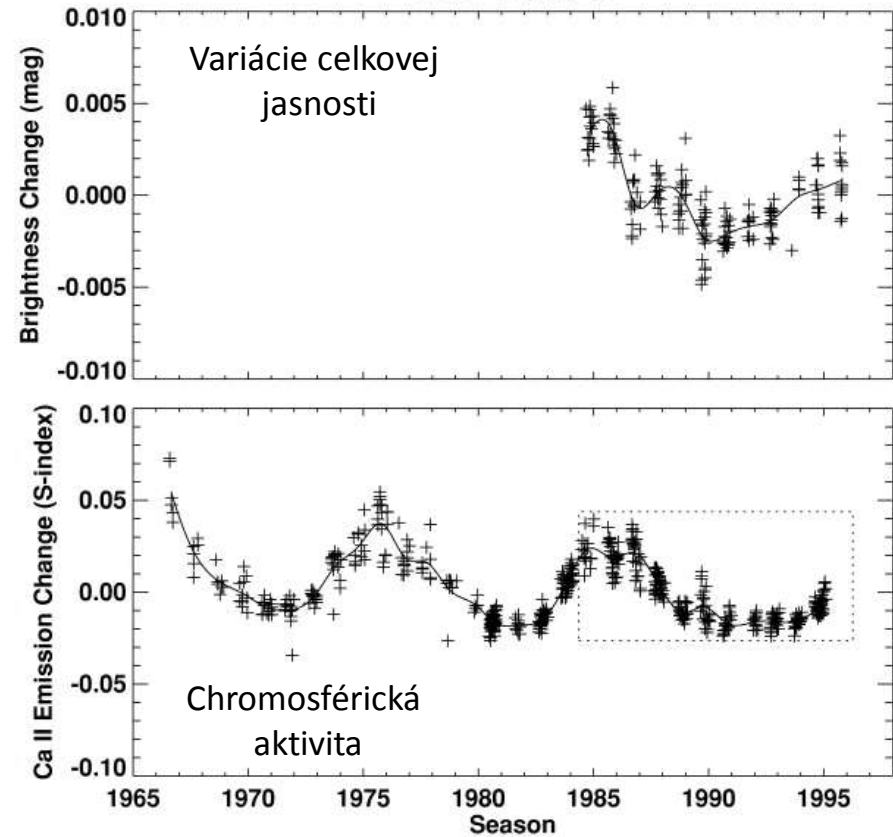
HD 1835



mladá hviezda, vek: stovky mil. rokov

- spektrálny typ: G 2.5 V
- neperiodická aktivita
- antikorelácia jasnosť - aktivita

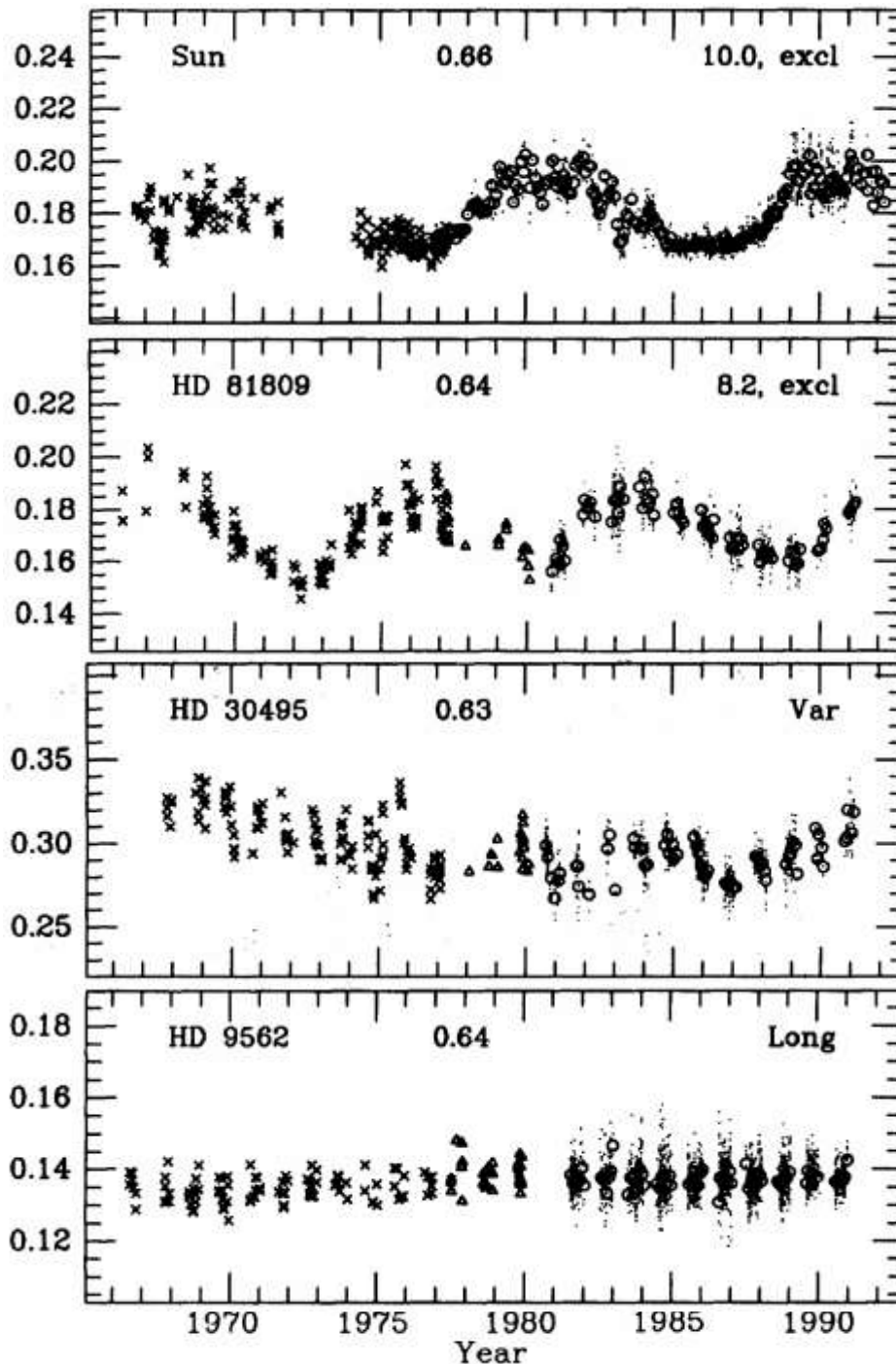
HD 10476



hviezda vo veku Slnka

- spektrálny typ: K1 V
- periodická, Slnku podobná aktivita
- Slnku podobná pozitívna korelácia jasnosť - aktivita

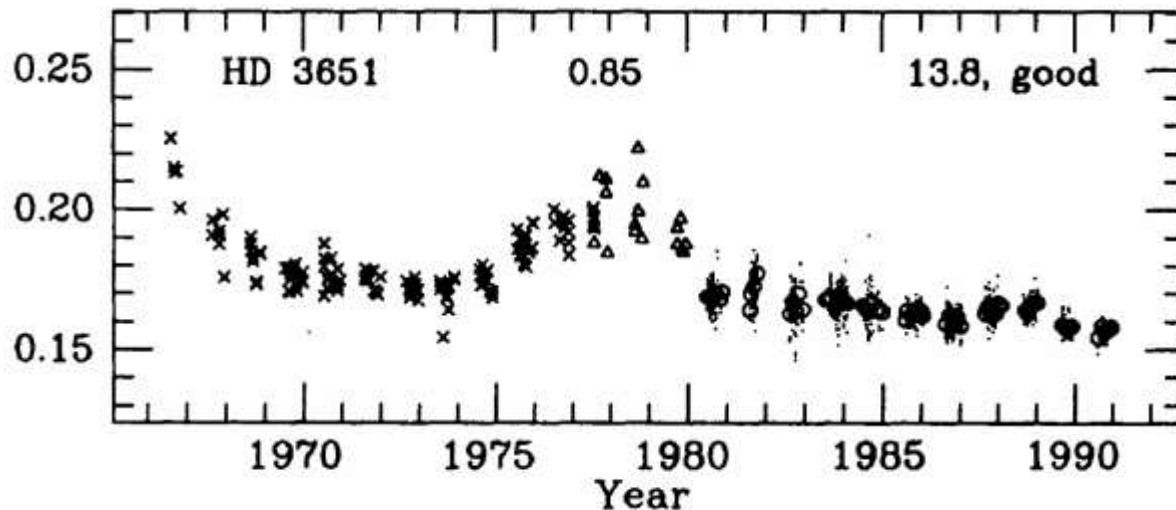
S , relative Ca II H + K flux



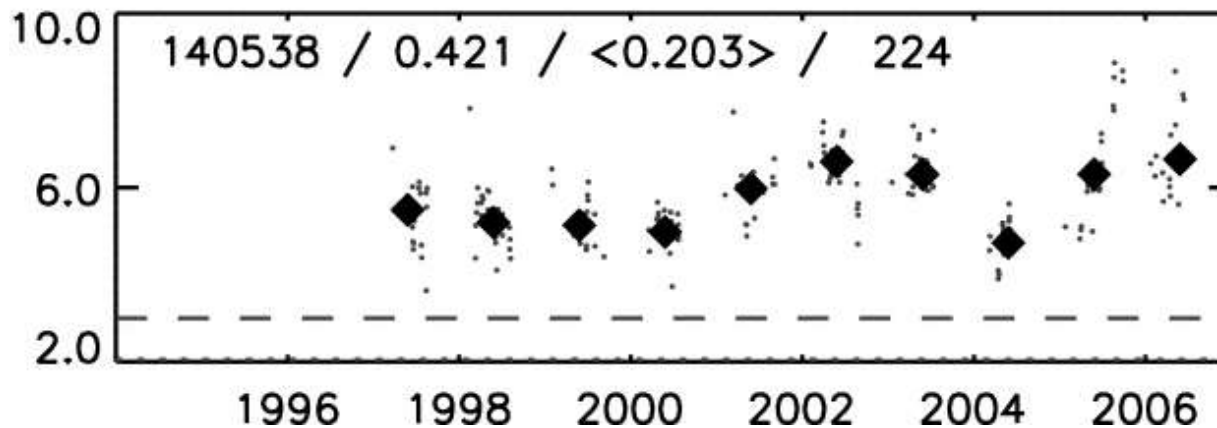
Chromosférická aktivita Slnka a podobných hviezd

- periodická aktivita
- hviezdy vo veku Slnka
- neperiodická aktivita
- mladé hviezdy, podstatne mladšie ako Slnko
- neaktívna alebo nemerateľná aktivita
- hviezdy staršie ako Slnko alebo hviezdy v Maunderovom minime

Maunderove minimá?



Hviezda vstupujúca do
Maunderovho minima?

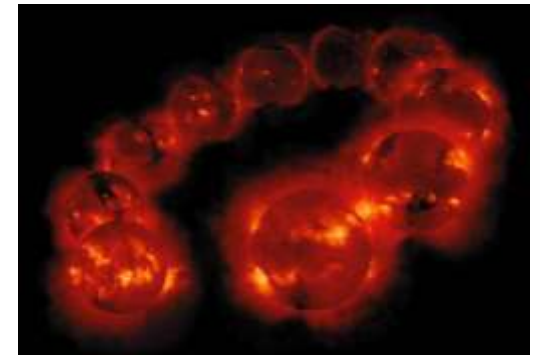
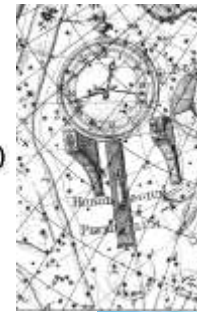
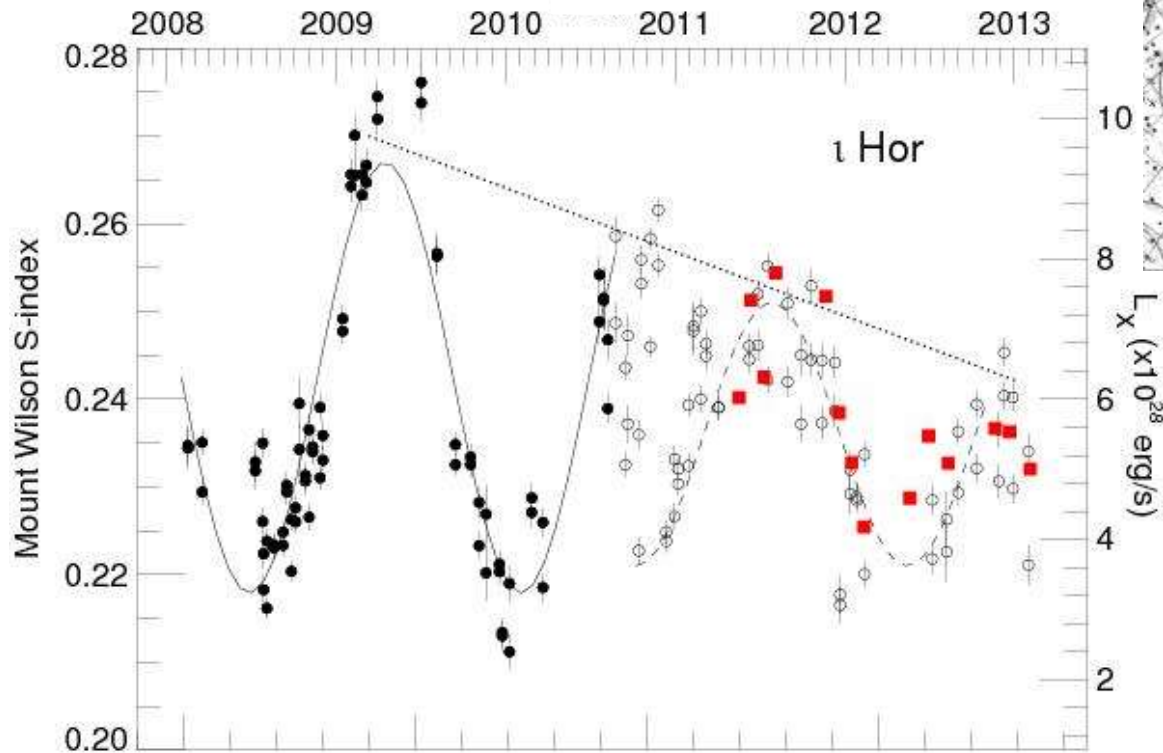


Hviezda po Maunderovom
minime?

[Baliunas a kol. 1995: Astrophysical Journal, vol. 438, p. 269.](#)

[Hall a kol. 2007: The Astronomical Journal, Volume 133, Issue 3, pp. 862-881.](#)

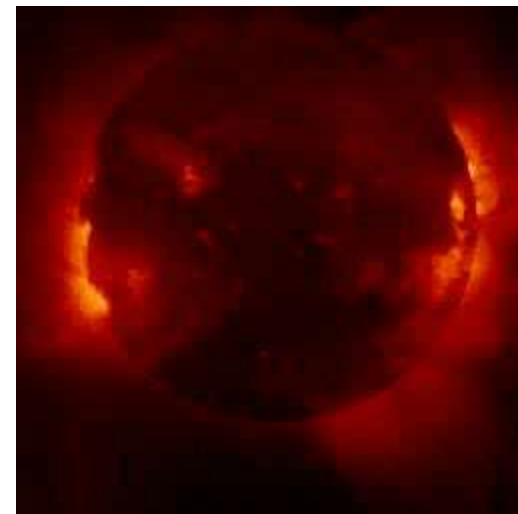
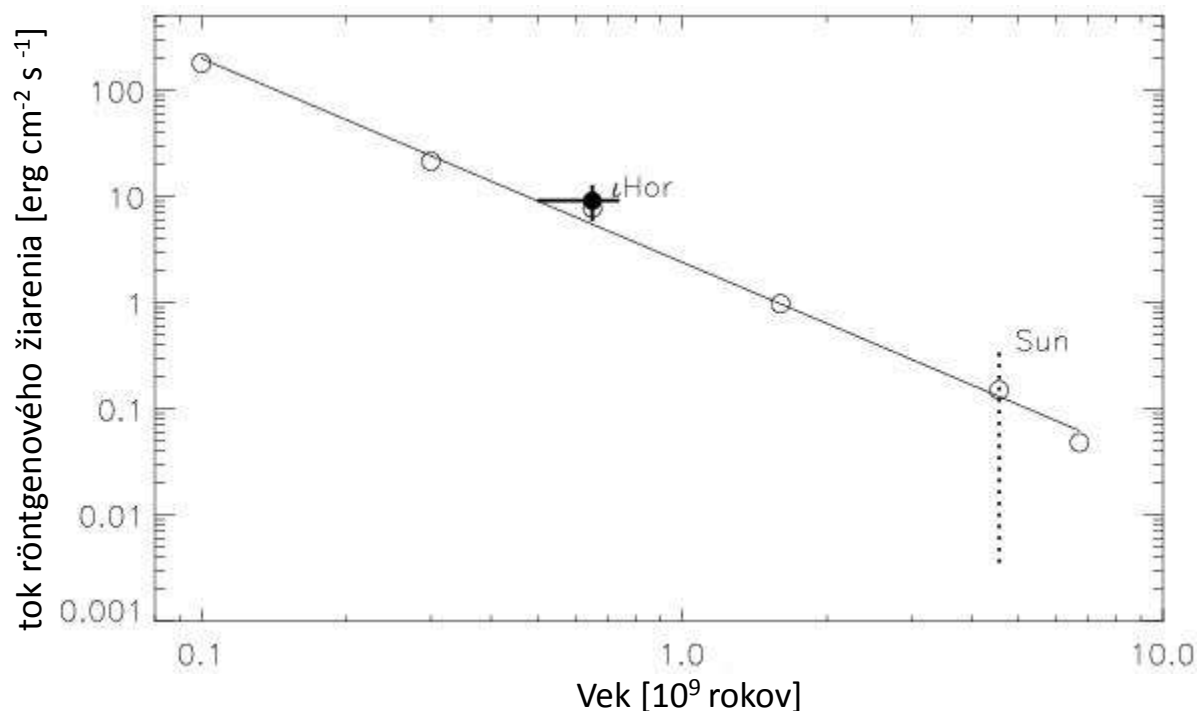
Cyklus aktivity Slnku podobnej 1 Horologi



- vek 1 Horologi: ~ 600 milión rokov, preto mladá
- krátky cyklus chromosférickej aktivity: 1,6 roka —————
- 2-ročný monitoring röntgenovým kozmickým observatóriom XMM-Newton
- cyklus **korónálnej aktivity** ■ s rovnakou periódou a vo fáze s chromosférickým cyklom ● ○ —————
- amplitúda cyklov klesá s časom

[Sanz-Forcada a kol. 2013: Astronomy & Astrophysics, 553, 6](#)

Koronálna aktivita Slnka a jemu podobných hviezd

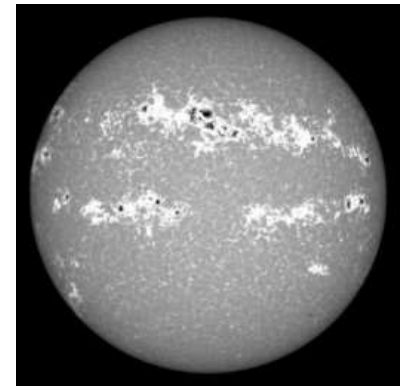
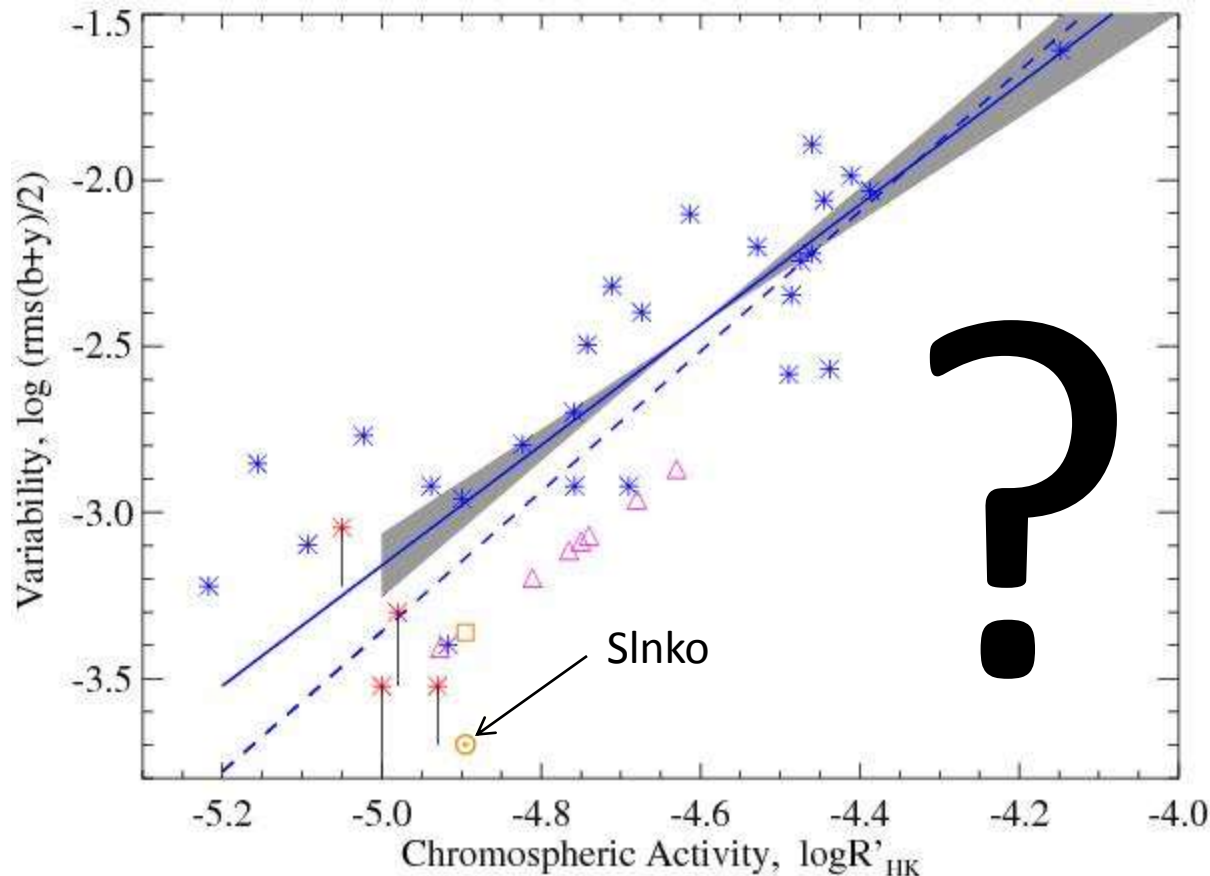


Koronálna aktivita Slnka v röntgenovom žiarení

koronálna aktivita:

- Slnku podobných hviezd s vekom klesá
- Slnka v porovnaní s jemu podobnými mladšími hviezdami je výrazne nižšia

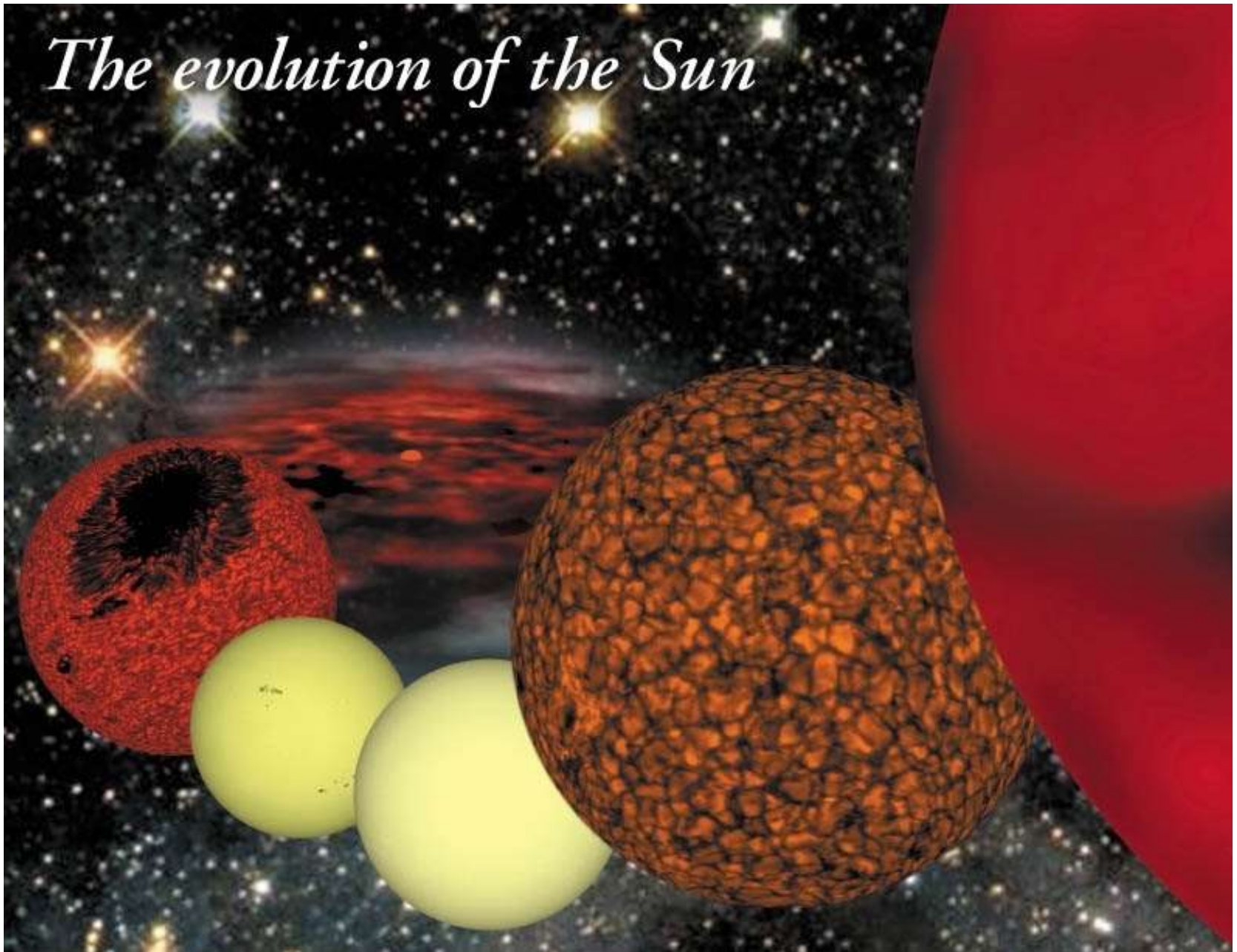
Aktivita Slnka a jemu podobných hviezd



Aká je aktivita Slnka v porovnaní s jemu podobnými hviezdami?

[Shapiro a kol.: 2013, Astronomy & Astrophysics, 552, 114](#)

The evolution of the Sun



The evolution of the Sun

Zo života Slnka a jeho dvojníkov

vznik: pred 4,57 miliardami rokov

prvé desiatky miliónov rokov života:

- rýchla rotácia a vysoká magnetická aktivita
- gigantické škvrny aj v polárnych oblastiach
- časté erupcie a výrony koronálnej hmoty
- nepravidelnosť magnetickej aktivity
- výrazné zmeny jasnosti v dôsledku veľkých škvŕn
- granulárne bunky pozdĺžne v smere rotácie
- intenzívny hviezdny vietor



The evolution of the Sun

Zo života Slnka a jeho dvojníkov

vznik: pred 4,57 miliardami rokov

prvé desiatky miliónov rokov života:

- rýchla rotácia a vysoká magnetická aktivita
- gigantické škvrny aj v polárnych oblastiach
- časté erupcie a výrony koronálnej hmoty
- nepravidelnosť magnetickej aktivity
- výrazné zmeny jasnosti v dôsledku veľkých škvŕn
- granulárne bunky pozdĺžne v smere rotácie
- intenzívny hviezdny vietor

dozrievanie do súčasnej podoby:

- spomaľovaním rotácie v dôsledku straty momentu hybnosti unášaného hviezdny vetrom
- granulárne bunky kvázipravidelného tvaru s rozmerom 1000 km
- menšia intenzita magnetickej aktivity
- kváziperiodická aktivita prerušovaná Maunderovými minimami

The evolution of the Sun

Zo života Slnka a jeho dvojníkov

vznik: pred 4,57 miliardami rokov

prvé desiatky miliónov rokov života:

- rýchla rotácia a vysoká magnetická aktivita
- gigantické škvrny aj v polárnych oblastiach
- časté erupcie a výrony koronálnej hmoty
- nepravidelnosť magnetickej aktivity
- výrazné zmeny jasnosti v dôsledku veľkých škvŕn
- granulárne bunky pozdĺžne v smere rotácie
- intenzívny hviezdny vietor

dozrievanie do súčasnej podoby:

- spomaľovaním rotácie v dôsledku straty momentu hybnosti unášaného hviezdny vetrom
- granulárne bunky kvázipravidelného tvaru s rozmerom 1000 km
- menšia intenzita magnetickej aktivity
- kváziperiodická aktivita prerušovaná Maunderovými minimami

záver života na hlavnej postupnosti:

- spomalenie rotácie
- postupné vymiznutie magnetickej aktivity
- žiadne škvrny a erupcie, nuda, zato na Zemi horúco až až
- expanzia na červeného obra
- enormne veľké konvektívne bunky

The evolution of the Sun

