

Hviezdni dvojníci Slnka

J. Koza, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, koza @astro.sk

Abstrakt

O jedenásťročnom cykle slnečnej aktivity vieme 166 rokov a pozorujeme ho 400 rokov. Fyzika Slnka má stále ďaleko k pochopeniu tohto prejavu činnosti magnetického dynama Slnka, ktoré z neho robí premennú hviezdu. Pozorovanie Slnku podobných hviezd a jeho dvojníkov pomáha pochopiť chovanie slnečného a hviezdneho magnetického dynama. Príspevok ponúka prehľad klasifikácie hviezd podobných Slnku, predstavuje ich využitie v rôznych odvetviach astrofyziky, stručne popisuje metódy výskumu ich variability a na záver sumarizuje celý životopis Slnka a jeho magnetickej aktivity, ktorý bol zostavený na základe štúdia veľkého štatistického súboru jemu podobných hviezd.

1. ÚVODNÉ JAZYKOVÉ OKIENKO

V anglickej astronomickej literatúre je možné stretnúť sa s výrazom *solar twin*, ktorého korektný slovenský a český preklad by znel slnečné dvojča. V oboch jazykoch slovo dvojča označuje jedinca pochádzajúceho z rovnakého tehotenstva, ako druhé dvojča, ktorým je geneticky aj vzhľadovo totožný jedinec. Anglické *solar twin* preto navodzuje dojem, akoby z protosolarnej hmloviny, z ktorej vzniklo Slnko, zároveň vznikol aj jeho súrodenec, jeho dvojča, o ktoré Slnko nejakým spôsobom prišlo, a všetko, čo by súviselo s hľadaním a výskumom tohto hypotetického slnečného dvojčaťa by sa nieslo pod hlavičkou *solar twin*. Nevieme zatiaľ úplne spoľahlivo vylúčiť, že Slnko nemalo pri svojom počiatku jedného alebo viac hviezdnych súrodencov vzišúcich zo spoločnej materskej protosolarnej hmloviny. Aj keby tomu tak bolo, čo je veľmi nepravdepodobné, hviezdna evolúcia nepozná mechanizmy analogické biologickým, ktoré by zachovávali akúsi genetickú zhodu hviezd. Preto platí axióma: *Všetky hviezdy sú odlišné. Ak sa nám niektoré javia ako zhodné, potom sa nepozerať pozorne.* Háčik je v tom, že anglickým *twin* sa tu myslí dvojník, označujúci niekoho veľmi podobného, no bez priamej genetickej príbuznosti. Pre tento prípad má angličtina výstižnejšie ekvivalenty *look-alike* alebo z nemčiny prevzaté *doppelganger*, ktoré sú však pochopiteľne veľmi nepraktické a jazykovo neobratné, čo celkom dobre vysvetľuje, prečo sa zaužíval termín *solar twin* alebo *solar twins*, ktorý z vyššie uvedených dôvodov prekladáme ako *dvojníci Slnka* dominujúci aj názvu tohto článku.

2. KLASIFIKÁCIA

Dvojníci Slnka sú len jednou podskupinou širšej skupiny hviezd, ktorých vybrané fyzikálne charakteristiky sú v istej miere podobné analogickým charakteristikám Slnka. Podľa miery ich podobnosti sú rozdelené do

nasledujúcich troch skupín odrážajúcich presnosť pozorovacích metód, s ktorou sme schopní vybrané charakteristiky zmerať:

- hviezdy podobné Slnku (hviezdy slnečného typu),
- slnečné analógy,
- dvojníci Slnka,
- habhviezdy.

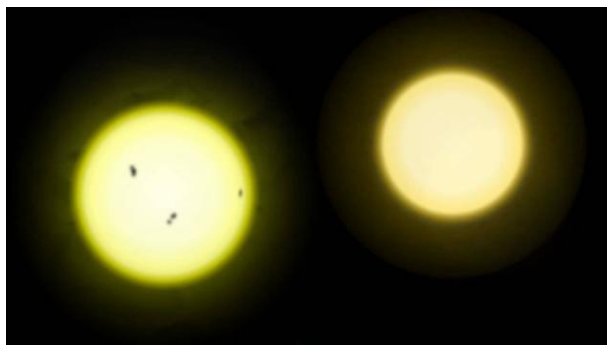
3. HVIEZDY PODOBNÉ SLNKU

Do tejto kategórie sú zaradené hviezdy hlavnej postupnosti, ktorých farebný index $B-V$ je z intervalu 0,48 až 0,8¹. Len pre porovnanie, ten istý farebný index Slnka je 0,65. Podľa alternatívnej definície založenej na spektrálnom type patria do tejto kategórie hviezdy spektrálneho typu F8 V až K2 V, pričom tomuto kritériu vyhovuje až 10 % hviezd. Hviezdy podobné Slnku sa prejavujú nápadnou závislosťou medzi rýchlosťou rotácie, chromosférickou a koronálnou aktivitou. Príklady blízkych jasných hviezd slnečného typu ľahko identifikovateľných na oblohe sú v tabuľke č. 1, v ktorej sú aj počty známych exoplanét. Prvou v tabuľke je ϵ Eridani, ktorá je zo všetkých osamelých, voľným zrakom viditeľných hviezd treťou najbližšou. Je to pomerne mladá hviezda, ktorej vek je odhadovaný na menej ako jednu miliardu rokov.

Tab. č. 1. Príklady hviezd slnečného typu

	jasnosť [mag]	vzdialenosť [svet. rok]	spektrálny typ	teplota [K]	exoplanéty
ϵ Eridani	3,7	10,5	K2 V	5153	1
τ Ceti	3,5	12	G8 V	5344	5
40 Eridani A (σ^2 Eridani)	4,4	16,5	K1 V	5126	

¹ jednotka farebného indexu mag je vynechaná v súlade so zaužívanou zvyklosťou



Obr. č. 1. Slnko (vľavo) je trochu väčšie, horúcejšie a aktívnejšie ako τ Ceti (vpravo). Autor: R.J. Hall.

4. SLNEČNÉ ANALÓGY

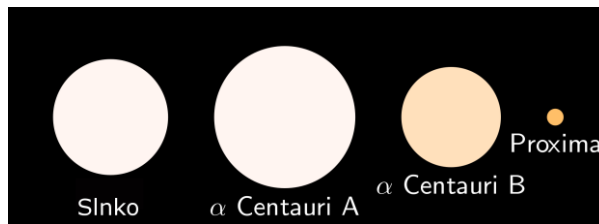
Táto kategória je podskupinou predchádzajúcej a patria do nej hviezdy s teplotou líšiacou sa od teploty Slnka 5778 K o menej ako ± 500 K, metalicitou v rozsahu od 50 % do 200 % slnečnej metalicity a bez sekundárnej zložky s obežnou dobou kratšou ako 10 dní. Posledné kritérium súvisí s tým, že prípadná sekundárna zložka s kratšou obežnou periódou by slapovým gravitačným pôsobením, obrazne povedané, vnútila primárnej zložke synchronnú rotáciu, ktorá je podstatne rýchlejšia, ako rotácia, ktorú by mala ako osamelá hviezda rovnakého veku. Prítomnosť blízkeho sekundáru by sa tak prejavila vysokou aktivitou hviezdy neprimeranou jej veku. Kritérium zároveň vylučuje možnosť prenosu hmoty medzi zložkami. Príklady blízkyh jasných slnečných analógov ľahko identifikovateľných na oblohe sú v tabuľke č. 2 a na obrázku č. 2.

Tab. č. 2. Príklady slnečných analógov

	jasnosť [mag]	vzdialenosť [svet. rok]	spektrálny typ	teplota [K]
α Centauri A	0,0	4,4	G2 V	5847
α Centauri B	1,3	4,4	K1 V	5316
σ Draconis	4,7	19	K0 V	5297
η Cassiopeiae A	3,4	19,4	G0 V	5941

5. DVOJNÍCI SLNKA

Hviezdy tejto kategórie sú momentálne dostupnými prostriedkami takmer nerozlišiteľné od Slnka a sú pochopiteľne úzkou podskupinou predchádzajúcej kategórie. Ich teplota sa líši od teploty Slnka 5778 K o menej ako ± 50 K, metalicita je v rozsahu od 89 % do 112 % slnečnej, nemajú žiadneho sekundárneho sprievodcu a ich vek sa líši od veku Slnka, ktorý je 4,57 miliárd rokov, o menej ako ± 1 miliardu rokov. Príklady blízkyh jasných dvojníkov Slnka sú v tabuľke č. 3, kde pre porovnanie sú uvedené aj vybrané charakteristiky Slnka ako aj vek v miliárdach rokov. Existujú náznaky, že najvernejší doteraz známy dvojník Slnka 18 Scorpii má cyklus hviezdnej aktivity kratší o niekoľko rokov ako 11-ročný slnečný cyklus. Amplitúda aktivity, teda variácie jasnosti 18 Scorpii, je podobná slnečnej a má hodnotu 0,1 %.



Obr. č. 2. Porovnanie veľkostí a farieb hviezd sústavy α Centauri a Slnka. Autor: D. Benbennick.

Tab. č. 3. Príklady hviezdnych dvojníkov Slnka

	jasnosť [mag]	vzdialenosť [svet. rok]	spektrálny typ	teplota [K]	vek [10^9 rokov]
Slnko	-26,7	0,0	G2 V	5778	4,57
18 Scorpii	5,5	45	G2 V	5835	4,2
HD 101364 (súhv. Drak)	8,7	208	G5 V	5795	3,5

6. HABHVIEZDY

Táto podskupina Slnku podobných hviezd bola zavedená iba nedávno a staršie štúdie ju preto neuvádzajú. Jej názov je slovný novotvar odvodený z anglického *habitable star* alebo *habstar*, teda obývateľná hviezda. Tým sa pochopiteľne myslí hviezda, ktorej fyzikálne charakteristiky sú natoľko blízke slnečným, že v jej okolí sú podmienky pre vznik Zemi podobných planét vhodných pre život v dlhodobu stabilnej obývateľnej zóne, v ktorej sa môže vyskytovať voda v kvapalnom stave. O zavedenie tejto kategórie sa významne zaslúžila Dr. Margaret Turnbull, ktorá je spoluautorkou habkatalógu viac ako 17 000 blízkyh habhviezd.

Vek habhviezd je minimálne 3 miliardy rokov, sú na hlavnej postupnosti, neprejavujú výraznú variabilitu jasnosti a majú taký systém exoplanét, ktorý zabezpečuje dlhodobú dynamickú stabilitu obývateľnej zóny. Metalicita habhviezd má byť dostatočne vysoká na to, aby v jej okolí mohli vzniknúť terestrické, teda Zemi podobné planéty. Uvedené podmienky spĺňajú hviezdy s hmotnosťou menšou ako 1,5 hmotnosti Slnka a chladnejšie ako spektrálny typ F5 V. Prípadné kolísanie jasnosti habhviezd by nemalo presiahnuť 3 % a jej metalicita by mala byť minimálne 40 % metalicity Slnka.

Príkladom habhviezd je hviezda HD 70 642 v južnom súhvezdí Korma. Je to žltý trpaslík vzdialený 92 svetelných rokov s hmotnosťou a polomerom ako Slnko, je však o niečo chladnejší a menej svietivý. Vo vzdialenosti 3,2 AU ju obieha po takmer kruhovej dráhe hmotná, Jupiteru podobná exoplanéta. Podobnosť hviezd so Slnkom zabezpečuje, že jej obývateľná zóna je približne vo vzdialenosti 1 AU a jej Exojupiter s hmotnosťou minimálne dvoch Jupiterov zabezpečuje stabilitu dráhy prípadnej Zemi podobnej exoplanéty s dráhou v obývateľnej zóne.

7. OBÝVATEĽNÁ ZÓNA

Obývateľnou zónou (ďalej ako OZ) je myslená prsten-cová oblasť okolo hviezdy, v ktorej sa môže na terestrických planétach s dostatočným tlakom atmosféry vyskytovať tečúca voda. Hranice OZ sú určované na základe požiadaviek definovaných biosférou Zeme, jej polohou v Slnčnej sústave a množstvom žiarivej energie, ktorú prijíma zo Slnka. Odhady dolnej a hornej hranice OZ Slnčnej sústavy sa značne líšia. Jej vnútorný okraj kladú rôzni autori do vzdialenosti od 0,72 do 0,99 AU a jej vonkajší okraj do vzdialenosti od 1,01 AU až do 3 AU, teda hlboko do hlavného pásu asteroidov za dráhu trpasličej planéty Ceres.

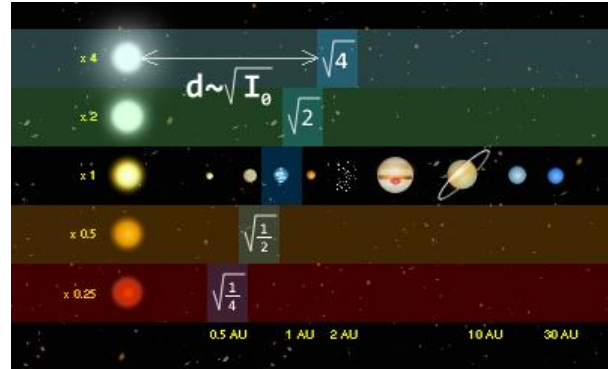
Vzdialenosť OZ od hviezdy rastie približne s druhou odmocninou jej svietivosti, čo ilustruje obrázok č. 3. Nasledujúci obrázok č. 4 dokumentuje závislosť vzdialenosti a šírky OZ od hmotnosti hviezdy pre prípad Slnčnej sústavy a sústavy šiestich exoplanét obiehajúcich okolo menej hmotného, červené trpaslika Gliese 581 v súhvezdí Váhy. Zatiaľ nezávisle nepotvrdená exoplanéta Gliese 581 g leží takmer uprostred OZ. Je to prípad veľmi hmotnej, Zemi podobnej exoplanéty, takzvanéj Superzeme. Ak sa jej existencia potvrdí a skutočne sa jedná o kamennú planétu s atmosférou, potom podmienky na jej povrchu by mali dovoliť prítomnosť tečúcej vody. Obrázok č. 5 porovnáva veľkosť OZ Slnčnej sústavy a hviezdy podobnej Slnku 40 Eridani už skôr spomenutej v tabuľke č. 1.

Koncepcia OZ ako rozhodujúceho faktoru podmieniňujúceho výskyt života je narušená objavom kvapalnej vody ďaleko za hranicami OZ. Najznámejším príkladom je mesiac Jupiteru Európa, ktorý by mal mať rozsiahly podpovrchový oceán vody. V týchto prípadoch už nie je rozhodujúca žiarivá energia zo Slnka, ale napríklad gravitačný slapový ohrev mesiaca centrálnou planétou, rádioaktívny rozpad prvkov, prípadne vysoký tlak vyvolaný nadložnými vrstvami. Spolupôsobenie týchto a ďalších faktorov môže zabezpečovať dostatočný prísun energie pre udržanie kvapalného vodného oceánu. Podobne aj na ďalších mesiacoch veľkých planét je možná prítomnosť kvapalnej vody. Nasvedčuje tomu mohutný kriovulkanizmus vodného ľadu pozorovaný v roku 2005 sondou Cassini na Saturnovom mesiaci Enceladus, ktorý je na obrázku č. 6.

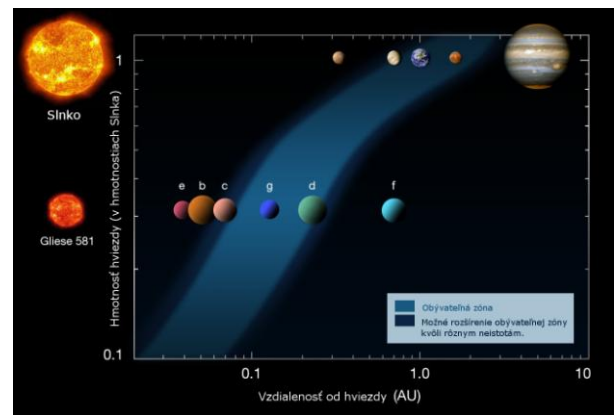
8. ČÍM SÚ HVIEZDNI DVOJNÍCI SLNKA UŽITOČNÍ?

Potreba identifikovať hviezdnych dvojníkov Slnka súvisí s nasledujúcimi astrofyzikálnymi problémami:

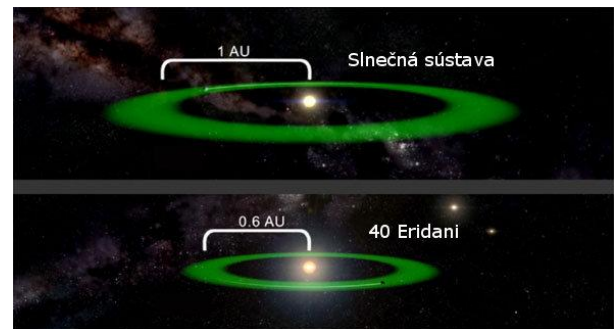
- vývoj Slnka na veľmi dlhých časových škálach rádo-vo miliárd rokov,
- pochopenie činnosti hviezdneho a slnečného magne-tického dynama,
- hviezdna a slnečná aktivita a jej periodicita,
- spektroskopía objektov Slnčnej sústavy.



Obr. č. 3. Závislosť vzdialenosti obývateľnej zóny d vyjad-
renej v astronomických jednotkách AU od svietivosti cen-
trálnej hviezdy I_0 .

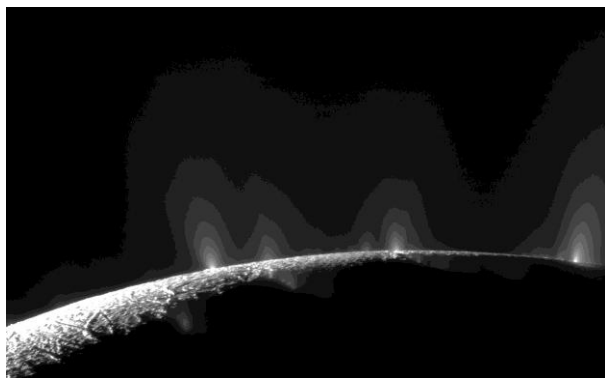


Obr. č. 4. Závislosť vzdialenosti a šírky obývateľnej zóny od
hmotnosti hviezdy pre prípad Slnčnej sústavy a sústavy
šiestich exoplanét obiehajúcich okolo červeného trpaslika
Gliese 581 nachádzajúceho sa v súhvezdí Váhy.



Obr. č. 5. Porovnanie veľkosti obývateľných zón Slnčnej
sústavy a hviezdy podobnej Slnku 40 Eridani.

Prvé tri zo spomenutých problémov navzájom veľmi úzko súvisia. Slnčná aktivita, ktorej najnápadnejším prejavom je variácia početnosti a veľkosti škvrn (Obrá-zok č. 7), je vonkajším prejavom činnosti slnečného magnetického dynama. Toto dynamo funguje kvázipe-riodicky so základnou periódou približne 11 rokov a s meniacou sa amplitúdou. V jeho činnosti nastávajú hlboké výpadky, príčina ktorých je neznáma. Príkladom je takzvané Maunderovo minimum slnečnej aktivity v období od roku 1645 do roku 1715, v ktorom bolo zaznamenaný mimoriadne nízky počet slnečných škvŕn.



Obr.č.6. Kriovulkanizmus alebo vodný vulkanizmus v oblasti južného pólu Saturnovho mesiaca Enceladus. Gezíry vodného ľadu tryskajúce z puklín v povrchu zachytila sonda Cassini v roku 2005.

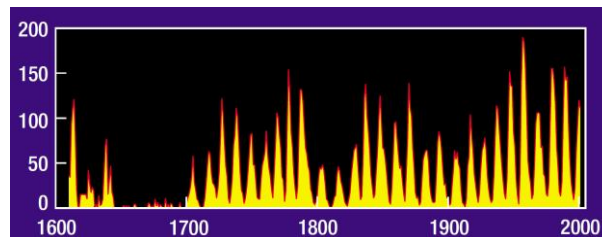
Ďalším sekundárnym prejavom aktivity Slnka sú nepatrné periodické variácie celkového slnečného vyžarovania s amplitúdou približne 0,1 %, ktoré sú vo fáze s cyklom slnečných škvŕn (Obrázok č. 8). Práve tie však môžu hrať významnú úlohu vo vzťahoch Slnko-Zem. Teleskopické pozorovania cyklov slnečnej aktivity pokrývajú interval 400 rokov a éra jej kozmického výskumu začala iba pred 40 rokmi. Pritom vek Slnka je 4,57 miliárd rokov. Ak by úsečka predstavujúca vek Slnka mala 1 m, potom úsečka reprezentujúca éru jeho teleskopického výskumu by mala iba desatinu mikrometra. Pochopiteľne, z tak krátkeho úseku je možné robiť iba nepriame odhady, aká bola slnečná aktivita v dávnejšej minulosti a čo môžeme od nej očakávať v budúcnosti. Tento problém krátkeho časového pokrytia istého javu pozorovaniami astrofyzika rieši štúdiom veľkého počtu fyzikálne čo najpodobnejších objektov nachádzajúcich sa v rôznych vývojových štádiách. A práve tu majú nezastupiteľné miesto prvé tri kategórie hviezdnych dvojníkov Slnka, štúdiom ktorých môžeme nahliadnúť do minulosti a budúcnosti slnečnej magnetickej aktivity (Obrázok č. 9) a celého života Slnka.

Posledný problém spektroskopie objektov Slnečnej sústavy súvisí s tým, že spektrum každého objektu slnečnej sústavy, či už planéty, kométy, alebo asteroidu, je súčtom slnečného a vlastného spektra objektu, ktoré ak chceme študovať, musíme od neho slnečné fotosférické spektrum odčítať. To je technicky možné iba tak, že po nasnímaní spektra objektu nasnímame rovnakou optickou sústavou a detektorom aj slnečné spektrum. Jeho zdrojom musí byť čo najvernejší dvojník Slnka, príklady ktorých sú uvedené v tabuľke č. 3.

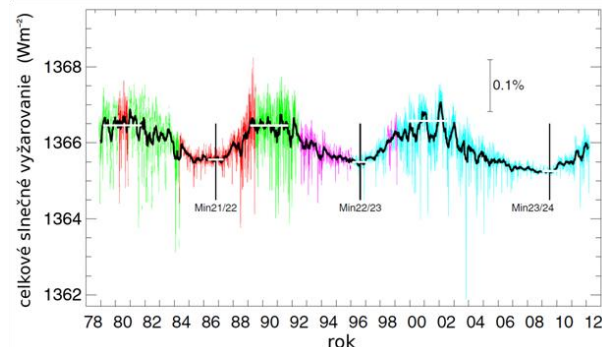
9. AKTIVITA A VARIABILITA DVOJNÍKOV SLNKA

Pretože okrem Slnka všetky hviezdy sú aj v tých najväčších ďalekohľadoch iba body, ich magnetickej aktivity a variabilita je študovaná nasledujúcimi nepriamymi metódami:

- presná širokopásmová fotometria celkovej jasnosti hviezd,



Obr. č. 7. Ročné priemerné počty slnečných škvŕn v rokoch 1609 až 2000. Nápadná absencia škvŕn v rokoch 1645 až 1715 sa nazýva Maunderovo minimum.



Obr. č. 8. Variácie celkového slnečného vyžarovania v rokoch 1978 až 2012.

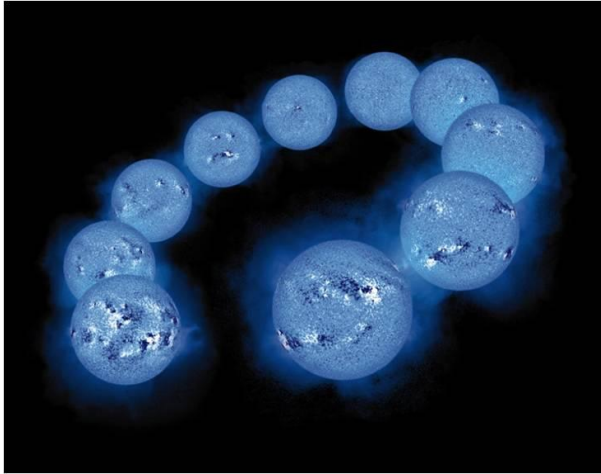
- úzkopásmová fotometria jasnosti jadra spektrálnej čiary jedenkrát ionizovaného vápnika Ca II K s vlnovou dĺžkou 393,4 nm vo fialovej časti spektra,
- fotometria röntgenového žiarenia hviezd.

Prvá metóda poskytuje nepriamu informáciu o početnosti a ploche slnečných škvŕn a fakulových polí vo fotosfére hviezd. Pretože centrum spektrálnej čiary Ca II K je formované v chromosfére, druhá metóda hovorí o celkovej ploche jasných chromosférických pláží, ktoré sú indikátorom magnetickej aktivity hviezd (Obrázok č. 11). Vyššia magnetickej aktivity hviezd sa prejavuje väčšou celkovou plochou a jasnosťou pláží a tým aj väčším tokom žiarenia v jadre čiary Ca II K. Röntgenové žiarenie hviezd pochádza z jej koróny a jeho pôvod súvisí s premenou energie magnetickej poľa hviezd na iné formy, jednou z ktorých je práve toto žiarenie (Obrázok č. 10). Aj v tomto prípade vyššia magnetickej aktivity sa prejavuje vyšším tokom röntgenového žiarenia.

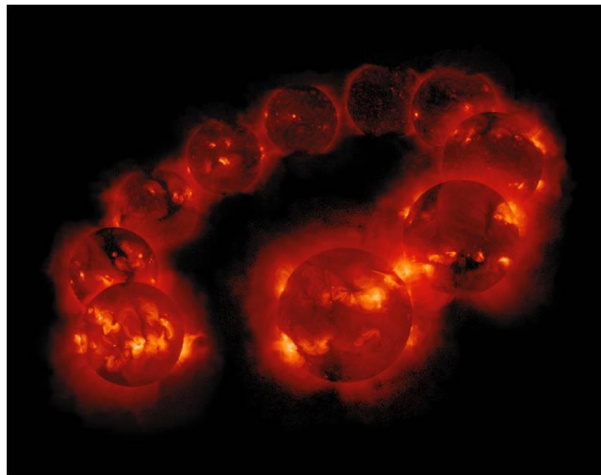
10. ZO ŽIVOTA SLNKA

Na základe pozorovaní veľkého štatistického súboru hviezdnych dvojníkov Slnka rôzneho veku a všetkých troch kategórií bolo možné poskladať nasledujúci životopis Slnka a jeho magnetickej aktivity, ktorý v skratke ilustruje obrázok č. 12.

Pre mladé Slnko v prvých desiatkach miliónov rokov života bola charakteristická rýchla rotácia, intenzívny slnečný vietor a vysoká magnetickej aktivity, neporovnateľne vyššia ako súčasná. Gigantické škvŕny spôsobovali



Obr. č. 9. Cyklus slnečnej aktivity. Mapy magnetického poľa Slnka pokrývajúce dve maxima slnečnej aktivity v rokoch 1991 (vľavo doľu) a 2001 (vpravo doľu) a minimum medzi nimi.

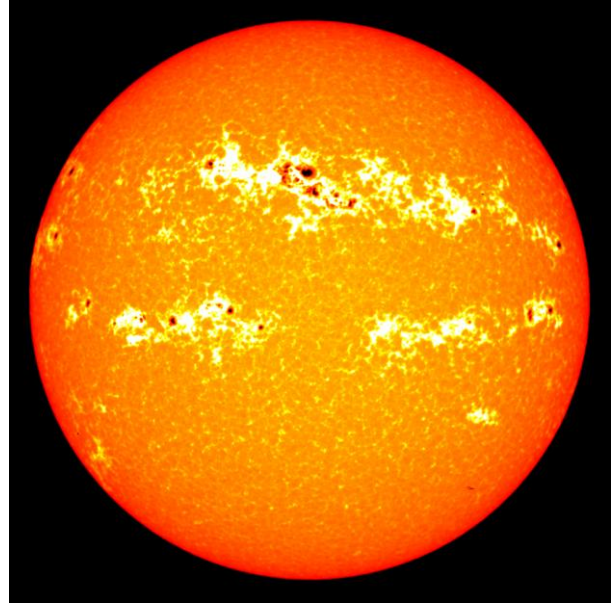


Obr. č. 10. Cyklus slnečnej aktivity z obrázku č. 9 v röntgenovom žiarení.

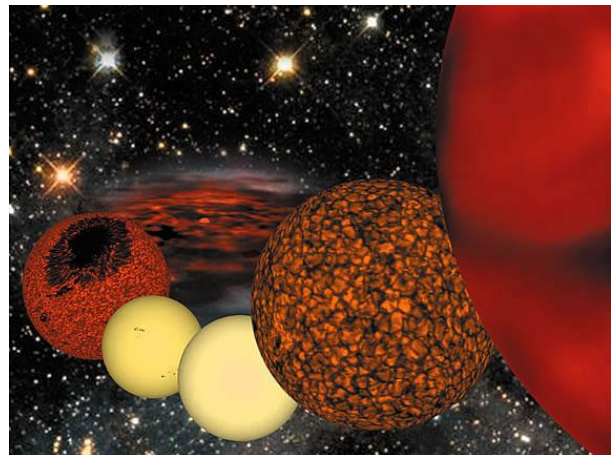
pomerne veľké variácie jasnosti a mohli sa vyskytovať aj v polárnych oblastiach a boli zdrojom častých erupcií a výronov koronálnej hmoty. Magnetická aktivita v tomto období bola veľmi nepravidelná bez výraznejšej periódy. Bunky fotosférickej granulácie boli oválne a pretiahnuté v smere rotácie.

Pre dospievanie Slnka do súčasnej podoby je charakteristické spomaľovanie rotácie v dôsledku straty momentu hybnosti unášaného hviezdnyim vetrom. Bunky granulácie nadobúdajú nepravidelný tvar s typickým priemerom približne 1000 km. Intenzita magnetickej aktivity klesá, stáva sa kváziperiodickou a je prerušovaná veľkými minimami, príkladom ktorých je Maunderovo minimum.

Pre záver života Slnka na hlavnej postupnosti je charakteristické ďalšie spomaľovanie rotácie a s tým súvisiace pohasínanie magnetickej aktivity. Disk Slnka je väčšinou bez škvrín. Po expanzii Slnka na červeného obra je jeho povrch pokrytý enormne veľkými konvekčívnyimi bunkami.



Obr. č. 11. Chromosféra Slnka snímaná v jadre spektrálnej čiary Ca II K. Slnečné škvrny sú obklopené rozsiahlymi poľami jasných pláží.



Obr. č. 12. Vývoj Slnka od protosolárnej hmloviny až po červeného obra. Autor: K. Schrijver.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0816-11. Táto práca bola podporená Vedeckou grantovou agentúrou - projekt VEGA 2/0108/12.