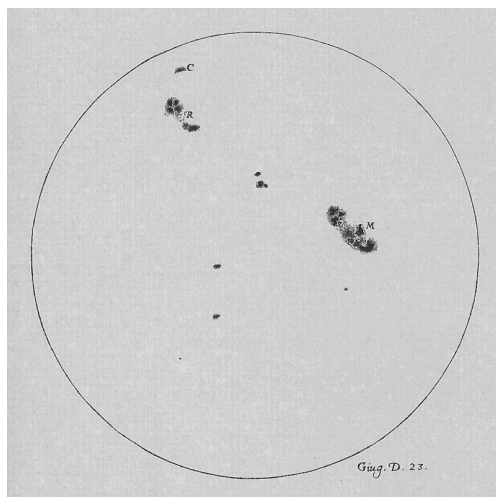


Slnko v roku astronómie

Július Koza, Tatranská Lomnica

1. Slnko v histórii poznania

Ľudstvo vníma Slnko ako svoju životodarnú hviezdu, ktorej zdanlivá stálosť poskytuje solidný pocit istoty v nestálosti pozemských a spoločenských javov. Je možné sa domnievať, že túto istotu narušajúce zatmenia Slnka boli v evolúcii ľudského myslenia práve jedným z javov, ktoré ľudstvo nútili hľadať príčiny a tak skúmať vonkajšie prostredie, v ktorom žije. Staroveká astronómia spoznala geometrickú podstatu zatmenia a stredoveká veda ešte nemala vhodné prostriedky, ktoré by spochybnil obraz stáleho a nemenného Slnka. Radikálny zlom nastal práve pred štyristo rokmi na jeseň roku 1609, keď Galileo Galilei zamieril svoj jednoduchý, vlastnoručne zhotovený refraktor na



Obr. 1. Galileiho kresba slnečných škvŕn z dňa 23. júna 1612.

oblohu. Galileiho revolučný čin je možné právom pokladať za okamih zrodu modernej astronómie a astrofyziky a na jeho počesť bol rok 2009 vyhlásený za Medzinárodný rok astronómie (IYA 2009). Galileiho teleskopické pozorovania Slnka, pri ktorých mimochodom takmer oslepol, a objav slnečných škvŕn (obr. 1) viacerými pozorovateľmi v rokoch 1609 až 1610 narušil vtedajšiu predstavu nemenného a dokonale jasného

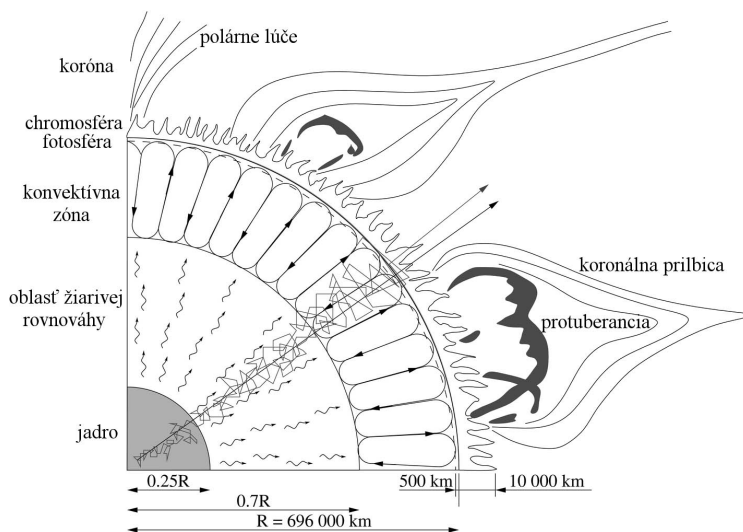
Mgr. JÚLIUS KOZA, Ph.D., Astronomický ústav SAV, Oddelenie fyziky Slnka, SK-059 60 Tatranská Lomnica, e-mail: koza@astro.sk

nebeského telesa. Približne v tých istých rokoch pozorovali slnečné škvrny svojimi refraktormi aj Thomas Harriot, Johann a David Fabricius a Christoph Scheiner, ktorí sú spolu s Galileim označovaní ako ich objavitelia. V nasledujúcich storočiach stálo Slnko pri mnohých významných medzníkoch ľudského poznávania. Spomeňme aspoň zmeranie astronomickej jednotky vzdialenosti, objav hélia, hľadanie zdroja hviezdnej energie, potvrdenie Einsteinovej všeobecnej teórie relativity a pozorovanie oscilácií neutrín, ktoré má hlboké dôsledky v teórii elementárnych častíc. Závažnosť astrofyzikálnych problémov, ktoré Slnko prinášalo v prvej štvrtine 20. storočia, je zrejmá z konštatovania významného teoretického astrofyzika Arthura Eddingtona, podľa ktorého mala v tom čase astrofyzika dva hlavné problémy, a to odhalenie zdrojov hviezdnej energie a vysokej opacity (t.j. nepriezračnosti) slnečnej fotosféry. V 20. storočí sa fyzika Slnka vyprofilovala na samostatné odvetvie astrofyziky, ktoré odhalilo veľkú priestorovú, časovú a spektrálnu mnohotvárnosť Slnka. Kľúčom k jej pochopeniu je slnečný magnetizmus. Slnko sa tak stalo hviezdny laboratóriom astrofyziky a ľudstvo si uvedomilo, že žije pod vplyvom pomerne búrlivej a aktívnej hviezdy vytvárajúcej okolo seba rozsiahlu heliosféru s vonkajším okrajom až za hranicami Slnečnej sústavy vo vzdialenosti približne 80 astronomických jednotiek. Článok je prehľadom poznatkov o štruktúre Slnka, hlavných fyzikálnych procesoch, ktoré ju podmieňujú, a problémov riešených súčasnou fyzikou Slnka. Medzinárodný rok astronómie je aj rokom začiatku nového cyklu slnečnej aktivity a najdlhšieho úplného zatmenia Slnka 21. storočia, čo je dobrá príležitosť zrekapitulovať naše poznatky o Slnku.

2. Štruktúra Slnka a určujúce fyzikálne procesy

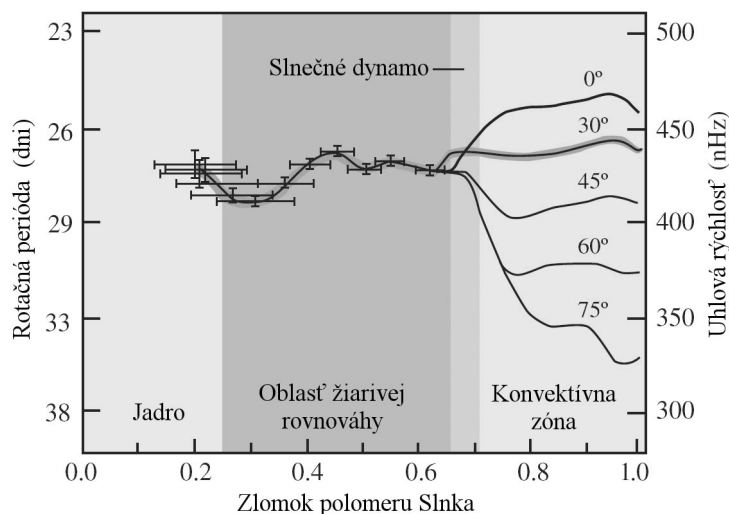
Hydrostatická stabilita Slnka je podmienená rovnováhou tlaku plynu a protitlaku horných vrstiev dôsledkom gravitácie. V dôsledku relatívne malej pravdepodobnosti termojadrových reakcií (obr. 2) sa stredná molekulová hmotnosť podmieňujúca tlak plynu v jadre Slnka významnejšie zmení až po uplynutí ďalších 5 miliárd rokov, kedy dôjde k narušeniu hydrostatickej rovnováhy a Slnko expanduje na červeného obra. Zdrojom 99 % energie Slnka sú tri možné formy proton-proton ($p-p$) cyklu, ktorého produktom sú okrem jadier hélia aj vysokoenergetické gama fotóny a neutrína. Zvyšné 1 % je produkováné CNO cyklom, v ktorom jadrá uhlíka a dusíka (prípadne aj kyslíka) sú katalyzátormi zlučovania protónov na héliové jadrá. Energetický zisk z týchto reakcií je dôsledkom hmotnostného schodku Δm medzi atómovou hmotnosťou hélia a sumárnou hmotnosťou štyroch protónov spolu s ekvivalenciou hmotnosti a energie $E = \Delta mc^2$. Kvôli silnej mocninovej závislosti energetickej produktivity $p-p$ a CNO cyklu na teplote, podmienky na ich realizáciu sú len v jadre zaberajúcom jednu štvrtinu polomeru Slnka (obr. 2), v ktorom teplota klesá z 15,6 milióna K v centre na 7,5 milióna K na vonkajšom okraji jadra [3]. V dôsledku termonukleárnych reakcií je Slnko ako celok chemicky nehomogénne a v jadre dominuje hélium s podielom približne 64 % na hmotnosti jadra a v vonkajších vrstvách vodík so zastúpením 71 % na ich hmotnosti [3]. Plazma v slnečnom vnútri má zanedbateľný účinný prierez pre interakciu neutrín s hmotou a tie priamočiaro unikajú zo Slnka nesúc nepatrnú časť energie uvoľnenej

v termonukleárných jadrových reakciách. Pozemské detektory neutrín umožnili nahliadnuť priamo do jadra Slnka a potvrdili, že naše predstavy o energetickom zdroji Slnka a jeho vnútornej stavbe sú správne. Merania toku slnečných neutrín však ukázali, že neutrína pri šírení priestorom oscilujú medzi tromi možnými formami označovanými ako elektrónové, miónové a tauónové neutrína. Teória elementárnych častíc takúto osciláciu pripúšťa iba ak majú neutrína nenulovú kludovú hmotnosť. Toto bol zásadne nový poznatok, ktorým výskum Slnka obohatil naše poznanie vlastností elementárnych častíc s presahom do riešenia problému tmavej hmoty a tajomnej tmavej energie vo vesmíre, ktorý je jedným z kľúčových problémov súčasnej kozmológie. Úplne opačná situácia je pri šírení elektromagnetického žiarenia uvoľneného v jadrových reakciách. Plazma v slnečnom vnútri vytvára vysoký účinný prierez pre normálny aj inverzný Comptonov rozptyl vysokoenergetických gama fotónov. Ich stredná voľná dráha medzi dvomi rozptylovými procesmi je nepatrná. Z toho dôvodu je väzba medzi poľom žiarenia a termodynamikou látky úplne dokonalá a nepriehľadné slnečné vnútro je príkladom veľmi dobre tepelne izolovaného absolútne čierneho telesa s obrovskou tepelnou kapacitou.



Obr. 2. Vnútna stavba Slnka a štruktúra atmosféry. Lomená čiara naznačuje difúziu fotónov slnečným vnútrom a postupné zväčšovanie ich strednej voľnej dráhy v porovnaní s priamou dráhou neutrín. Štruktúry nie sú v mierke.

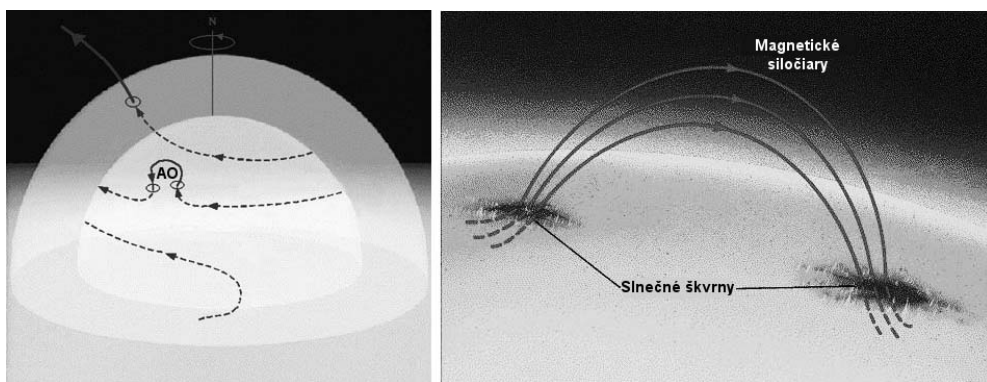
Šírenie žiarenia vo vrstvách nad jadrom má charakter difúzie a oblasť slnečného vnútra v rozsahu od 0,25 do 0,7 slnečného polomeru (obr. 2) je preto nazvaná ako oblasť žiarivej rovnováhy. Pri nespočetných rozptylových procesoch však fotón pri inverzných Comptonových rozptyloch nezískava úplne presne rovnakú energiu, akú látke odovzdal. Z toho dôvodu jeho energia postupne klesá a zodpovedá postupne röntgenovému, ultrafialovému žiareniu až napokon svetlu. Lomená trajektória fotónu slnečným vnútrom (obr. 2) pripomína trajektóriu náhodného pohybu, pri ktorom sa stredná voľná dráha postupne predlžuje v dôsledku približne exponenciálneho poklesu



Obr. 3. Rotačný profil Slnka pre heliografické šírky 0° , 30° , 45° , 60° a 75° vyjadrený pomocou rotačnej periódy a uhlovej rýchlosti. Na horizontálnej osi je radiálna vzdialenosť od stredu Slnka v zlomkoch slnečného polomeru. Interval 0,65 až 0,71 slnečného polomeru je oblasťou, v ktorej pravdepodobne sídli slnečné dynamo [4].

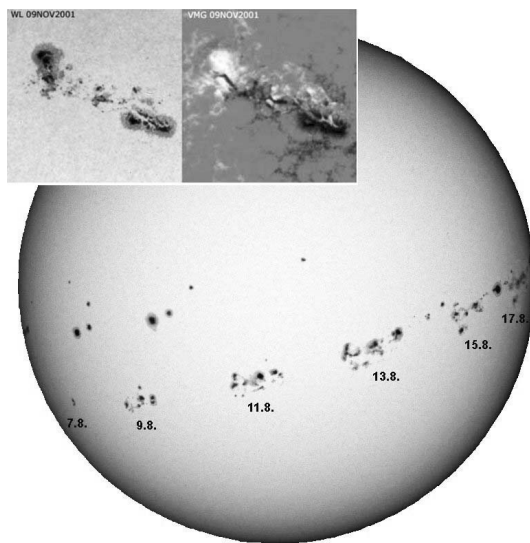
stavových veličín (tlak, hustota, teplota) v radiálnom smere. Nakoniec fotóny uniknú do kozmického priestoru, pričom prevažná časť z nich sú už fotónmi svetla.

Vo vzdialenosti 0,7 slnečného polomeru od jadra náhodné teplotné nehomogenity plynu už nie sú stabilné a utlmované a začínajú stúpať vytvárajúc tak konvektívnu zónu veľkoškálových prúdov ako efektívnejšej formy transportu energie na povrch. Ďalší zásadný rozdiel medzi konvektívnou zónou a oblasťou žiarivej rovnováhy je charakter rotácie (obr. 3). Zatiaľ čo oblasť žiarivej rovnováhy rotuje ako pevné teleso, konvektívna zóna rotuje diferenciálne a rýchlosť jej rotácie sa mení s heliografickou



Obr. 4. *Vľavo:* Rotácia v konvektívnej zóne navíja magnetické silotrubice po obvodu Slnka. Aktívne oblasti (AO) vznikajú v miestach prieniku silotrubíc nad povrch. *Vpravo:* Slnčné škvrny sú najznámejším reprezentantom aktívnych oblastí, ktoré majú bipolárnu štruktúru magnetického poľa.

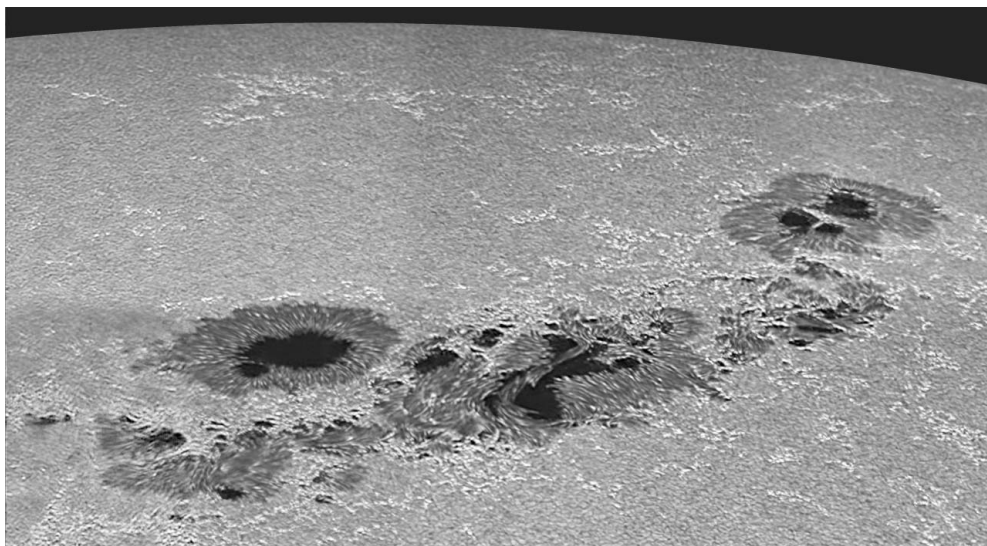
šírkou. Diferenciálnu rotáciu vonkajších vrstiev Slnka si všimli a opísali už začiatkom 17. storočia objavitelia slnečných škvŕn, no fyzikálne objasnenie príčin tohto javu je stále predmetom štúdia. Nepochybne sa na jej vzniku podieľa aj konvekcia. Rotačné profily na obr. 3 dokumentujú spomaľovanie rotačnej rýchlosti s narastajúcou heliografickou šírkou na povrchu Slnka. Rigidná rotácia oblasti žiarivej rovnováhy sa prejavuje konvergenciou rotačných profilov v hĺbke okolo 0,7 slnečného polomeru.



Obr. 5. *Hore vľavo*: Skupina slnečných škvŕn z dňa 9. novembra 2001, keď bolo Slnko blízko maxima 23. cyklu slnečnej aktivity (obr. 8). *Hore vpravo*: Mapa magnetického poľa dokumentuje bipolárnu štruktúru magnetického poľa v skupine škvŕn. Opačné polarities sú znázornené bielou a čiernou. *Dole*: Montáž piatich snímok dokumentujúca rotáciu Slnka a vývoj veľkej aktívnej oblasti v dvojdňových intervaloch. Pri okraji disku je nápadné okrajové stmernenie. Ľavý a pravý okraj obrázka približne zodpovedá východnému a západnému okraju Slnka.

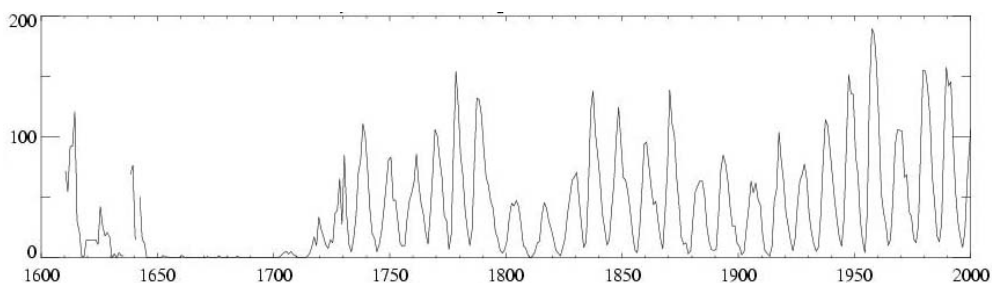
Rozhranie oblasti žiarivej rovnováhy a konvektívnej zóny je teda oblasťou veľkých gradientov rotačných rýchlostí, čo môže byť spoluzodpovedné za vznik javu známeho ako slnečné dynamo, ktorého úplné vysvetlenie a pochopenie fyzika Slnka stále nemá. Toto rozhranie je oblasťou vzniku slnečného magnetizmu, v ktorej je pravdepodobne časť kinetickej energie konvekcie a rotačnej energie oblasti žiarivej rovnováhy a konvektívnej zóny transformovaná do energie magnetického poľa. V konvektívnej zóne dynamika plazmy určuje štruktúru magnetického poľa v dôsledku vmrznutia magnetického poľa do plazmy, ktorá tak unáša siločiaru. Pôvodne poloidálne magnetické pole (obr. 4) je v dôsledku rotácie transformované na toroidálne a jeho veľkoškálová štruktúra a orientácia je daná rotáciou. Dynamika konvektívnej zóny pravdepodobne spôsobuje, že magnetické polia sú skoncentrované do podoby silotrubíc. Ich stabilita voči okolitému tlaku plynu si vyžaduje výrazný pokles hustoty vo vnútri silotrubíc, čím vzniká vztlak unášajúci silotrubice k povrchu Slnka, ktoré súčasne aj expandujú v dôsledku poklesu

okolitého tlaku. V miestach prieniku silotrúbice nad a pod slnečný povrch vznikajú takzvané aktívne oblasti, ktorých reprezentantmi sú slnečné škvrny (obr. 5), póry (obr. 18 vpravo) a fakulové polia (obr. 6 a 13). Všetky uvedené zložky aktívnych oblastí sú prejavmi slnečného magnetizmu. Vyvinuté aktívne oblasti môžu dosiahnuť rozmer až 150 000 km a životnosť až 2 mesiace (obr. 5). Životnosť malých aktívnych oblastí je niekoľko dní. Priemer typickej škvrny je približne 30 000 km a indukcia ich magnetického poľa je 0,2 až 0,3 T, teda desaťtisícnásobne viac ako je indukcia magnetického poľa Zeme. Životnosť typickej škvrny je niekoľko týždňov.

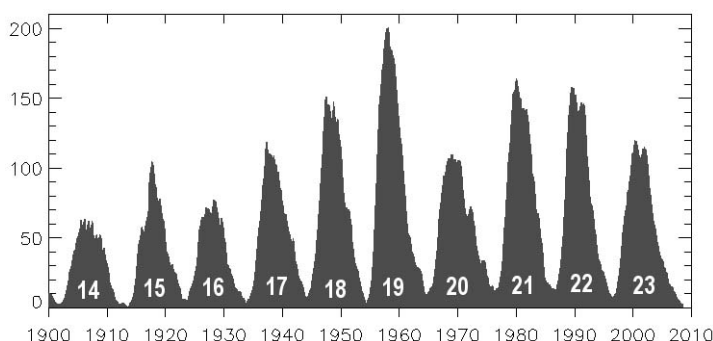


Obr. 6. Veľká aktívna oblasť v blízkosti okraja slnečného disku obsahujúca dobre vyvinuté škvrny s nápadne tmavou umbrou uprostred obklopenou svetlejšou penumbrou s radiálnymi vláknami. Menšie škvrny bez penumbry sú póry. Každá škvrna sa vyvinie z póru, no nie z každého póru vznikne škvrna. Medzi škvrnami sú nápadné jasné fakulové polia nepravidelného tvaru. Snímku získal Holandský otvorený teleskop 2. apríla 2001 v čase blízko maxima 23. cyklu slnečnej aktivity [6, 11].

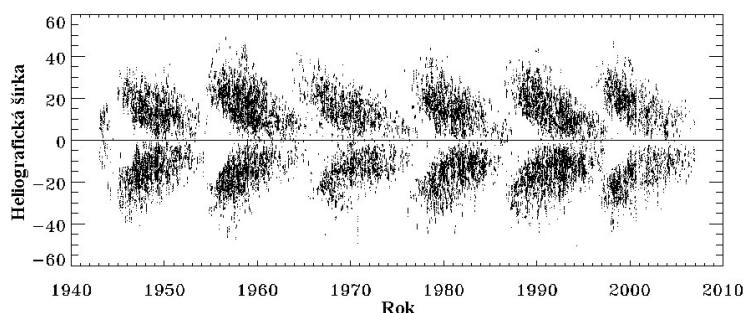
Dlhoročné pozorovania, ktoré začal v roku 1609 Galileo Galilei, odhalili časové a priestorové pravidelnosti vo výskyte aktívnych oblastí a ich magnetickej štruktúry. Najznámejším je cyklus s priemernou periódou približne 11 rokov, ktorý je definovaný početnosťou slnečných škvŕn (obr. 7 a 8). Obdobie medzi rokmi 1645 až 1715 je nápadne mimoriadnou zriedkavosťou pozorovaní slnečných škvŕn svedčiace o nie celkom pravidelnej činnosti slnečného dynama, ktorá nie je doteraz vysvetlená. Takmer úplnú absenciu pozorovaní slnečných škvŕn v tomto období si všimol a preštudoval Gustav Spörer koncom 19. storočia. Väčšiu pozornosť vyvolala táto skutočnosť až keď v roku 1893 Edward Walter Maunder publikoval svoju vlastnú štúdiu o historických pozorovaniach škvŕn v 17. storočí, podľa ktorého je obdobie veľmi nízkej slnečnej aktivity v rokoch 1645 až 1715 pomenované ako Maunderovo minimum. Ďalšou dôležitou charakteristikou slnečného dynama a cyklu je vzťah medzi heliografickou šírkou výskytu škvŕn a fázou cyklu (obr. 9), ktorú objavil Spörer a podľa charakteristického



Obr. 7. Ročné priemerné počty slnečných škvŕn v rokoch 1609 až 2000. Maunderovo minimum v rokoch 1645 až 1715 je nápadné mimoriadnou zriedkavosťou pozorovaní slnečných škvŕn.

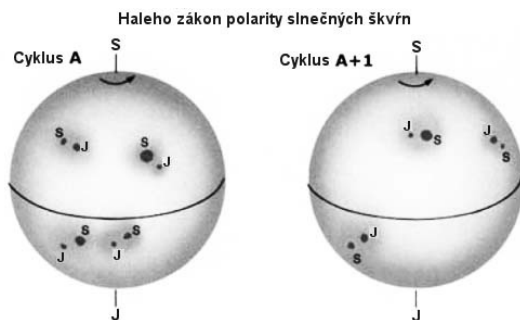


Obr. 8. Mesačné priemerné počty slnečných škvŕn v rokoch 1900 až 2008. Jednotlivé cykly sú číslované pričom poradové číslo 1 má cyklus s maximom v roku 1761. V roku 2009 začína 24. cyklus [10].



Obr. 9. Motýlikový diagram šírkovej závislosti výskytu slnečných škvŕn na fáze cyklu v rokoch 1945 až 2008 [13]. Heliografická šírka je v stupňoch.

vzhľadom má táto závislosť názov motýlikový diagram. Na začiatku nového cyklu sa škvŕny vyskytujú v heliografických šírkach okolo $\pm 30^\circ$. S postupom cyklu sa oblasti ich výskytu postupne posúva k rovníku. Znamená to teda, že škvŕny nie sú vôbec pozorované vo vysokých heliografických šírkach a v oblasti slnečných pólů. Ďalšou charakteristikou slnečného dynama je štruktúra magnetických polí aktívnych oblastí. V bipolárnych aktívnych oblastiach je možné rozlíšiť takzvanú vedúcu škvŕnu, ktorá je bližšie k západnému okraju v smere rotácie Slnka (obr. 5) a nasledujúcu škvŕnu.

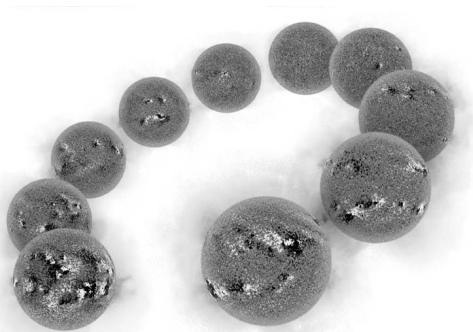


Obr. 10. Haleho zákony polarity slnečných škvrn. Písmená S a J pri rotačných osiach nie sú označenia magnetických polarít ako na disku, ale označenia heliografických pólů [1].

Pre štruktúru magnetických polí v aktívnych oblastiach platia nasledujúce pravidlá znázornené na obrázku 10:

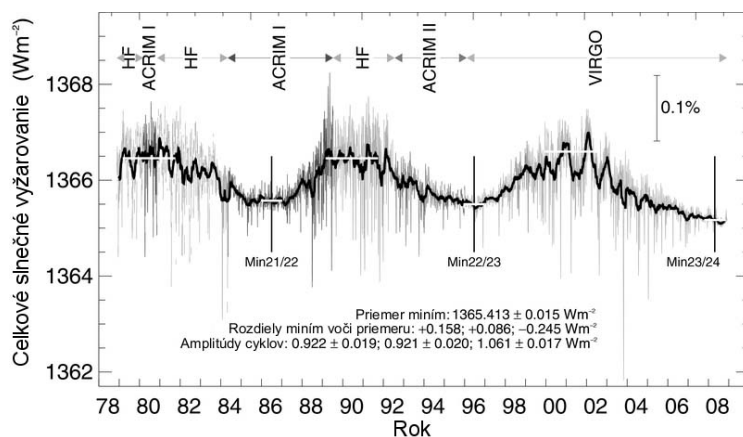
- 1) na danej pologuli majú aktívne oblasti vždy rovnaké usporiadanie polarít vzhľadom ku smeru východ-západ počas celého 11-ročného cyklu;
- 2) na opačných pologuliach majú aktívne oblasti navzájom opačné usporiadanie polarít;
- 3) po uplynutí 11-ročného cyklu sa polarita v aktívnych oblastiach na opačných pologuliach vymení.

Uvedené pravidlá sú pomenované ako Haleho zákony polarity slnečných škvrn, ktoré v roku 1919 publikoval George Ellery Hale. Magnetický cyklus slnečnej aktivity niekedy nazývaný aj Haleho cyklus tak trvá dvojnásobok škvrnového cyklu, teda približne 22 rokov. V okolí maxima slnečného cyklu dochádza k prepólovaniu aj magnetických pólů na oboch slnečných pologuliach. Dôsledky Haleho zákonov pre magnetickú štruktúru aktívnych oblastí počas 11-ročného cyklu dokumentuje obrázok 11. Už pohľad na slnečný disk posiaty tmavými škvrnami (obr. 1, 5 a 6) vyvoláva otázku, či sa ich prítomnosť prejavuje významnejšími zmenami celkového slnečného vyžarovania dopadajúceho na Zem. Má prítomnosť škvrn a rôzne amplitúdy 11-ročného cyklu (obr. 7 a 8) nejaký vplyv na podnebie a klímu? Pri hľadaní odpovede na tieto otázky sú potrebné veľmi presné merania celkového slnečného vyžarovania (ďalej len vyžarovania), t.j. slnečnej energie integrovanej v celom spektre dopadajúcej na jednotkovú plochu kolmú na smer žiarenia nad atmosférou Zeme vo vzdialenosti jednej astronomickej jednotky. Stredná hodnota tejto veličiny je 1365 Wm^{-2} a tradične je nazývaná ako „slnečná konštanta“, čo ako ukážeme ďalej nezodpovedá pozorovanej skutočnosti. Obrázok 12 pokrýva družicové merania vyžarovania počas 21., 22. a 23. cyklu v rokoch 1978 až 2008 (obr. 8). Ostré hlboké poklesy vyžarovania zodpovedajú prítomnosti veľkých aktívnych oblastí s početnými škvrnami na disku a priemerná 81-dňová hodnota vyžarovania je vyznačená hrubou čiarou. Porovnanie priebehu 21., 22. a 23. cyklu na obrázku 8 s priebehom vyžarovania na obrázku 12 ukazujú prekvapujúcu koreláciu. Obdobia okolo maxima cyklu s najväčšou početnosťou tmavých slnečných škvrn sú zároveň obdobiami s najväčším vyžarovaním. Čo je príčinou? Ako sme uviedli skôr, súčasťou aktívnych oblastí sú aj jasné fakulové polia (obr. 6). Pozorovania v úzkopásmových



Obr. 11. Variabilita slnečného magnetizmu. Mapy magnetického poľa (magnetogramy) dokumentujú polaritu a rozloženie magnetických polí vo fotosfére. Montáž negatívov magnetogramov začína v maxime 22. cyklu (obr. 8) v januári 1992 (vľavo) a končí v maxime nasledujúceho 23. cyklu v júli 1999 (vpravo). Magnetogramy znázorňujú opačné polaritu ako biele a tmavé plochy a boli získané pomocou Vákuového vežového teleskopu na Kitt Peak.

filtrach ukazujú, že celková plocha a jasnosť fakulových polí nielenže vyrovnáva, ale aj prevyšuje deficit vyžarovania spôsobeného škvrnami (obr. 13). Ako vidieť z obrázku 12, variácia vyžarovania medzi maximom a minimom slnečného cyklu je približne 0,1 %. Tento výsledok na obrázku 12 má zásadný význam pri posudzovaní úlohy slnečnej aktivity v súbore faktorov vplývajúcich na klimatické zmeny. Rok 2009 je rokom začiatku nového 24. cyklu slnečnej aktivity (obr. 8). Uplynulé mesiace prekvapili neobvykle dlhými obdobiami trvajúcimi až týždne, počas ktorých nebolo na disku Slnka možné pozorovať ani najmenšie náznaky aktivity. Nový cyklus sa však už nepochybne začal. V heliografických šírkach okolo $\pm 30^\circ$ sú ojedinele pozorovateľné aktívne oblasti nového cyklu, no zatiaľ bez väčších škvŕn. Nasledujúce mesiace a roky ukážu, či pozvoľný začiatok cyklu s veľkým počtom bezškvŕnových dní predznamenáva nejaké nové prekvapenie slnečného dynama.

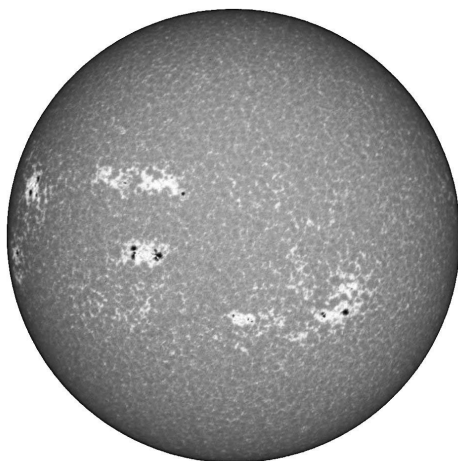


Obr. 12. Časová variácia celkového slnečného vyžarovania počas 21., 22. a 23. cyklu slnečnej aktivity [14]. Tenká čiara sú denné hodnoty a hrubá čiara 81-dňové priemerné hodnoty. Akronymy nad krivkou sú názvy družicových rádiometrov a šípky označujú obdobia ich činnosti.

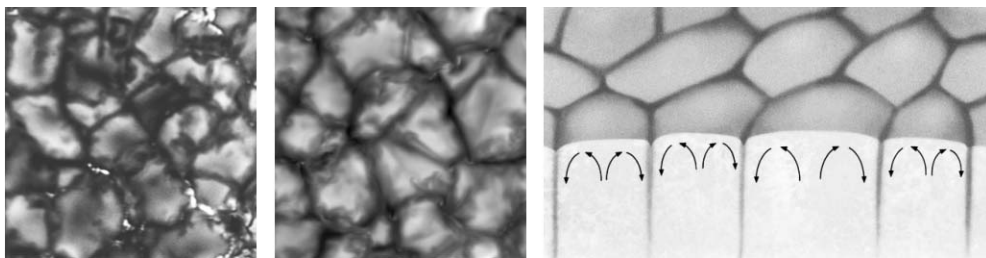
3. Atmosféra Slnka

3.1. Fotosféra

Svetlo uniká zo Slnka z tenkej, približne 500 km hrubej vrstvy s názvom fotosféra (z gréckeho $\phi\omega\tau\omicron\varsigma$ (svetlo) a $\sigma\phi\alpha\iota\rho\omicron\varsigma$ (guľa), ktorú vnímame ako viditeľný povrch Slnka, hoci kvôli svojej plazmatickej podstate Slnko povrch nemá. Inými slovami, fotosféra je najhlbšia časť atmosféry Slnka, kam až dovidíme a odkiaľ už vďaka dostatočnej priehľadnosti môžu fotóny uniknúť. Tlak v spodnej fotosfére je približne 10 kPa, teda asi desatina tlaku na úrovni mora v zemskej atmosfére. Teplota vo fotosfére s výškou klesá približne z 6400 na 4200 K, pričom jej efektívna teplota často uvádzaná aj ako teplota povrchu Slnka je 5770 K. Pokles teploty s výškou je príčinou okrajového stmernenia (obr. 5) slnečného disku. Pri okraji disku dovidíme do vyššie položených chladnejších a teda tmavších vrstiev a naopak v strede disku zorný lúč preniká do hlbších, horúcejších a jasnejších oblastí fotosféry. Z dôvodu nízkej ionizačnej energie 5 až 7 eV je väčšina kovov skupiny železa a alkalických kovov pri fotosférických teplotách v prvom ionizačnom stupni. Kovy sú teda hlavnými poskytovateľmi elektrónov vo fotosfére, ktoré vytvárajú z hojne zastúpeným vodíkom takzvané negatívne ióny vodíka, v ktorom protón viaže dva elektróny. Ionizačná energia negatívneho iónu vodíka je iba 0,75 eV a preto všetky fotóny s vlnovou dĺžkou kratšou ako $1,65\ \mu\text{m}$ (teda aj viditeľného svetla) dokážu uvoľniť druhý elektrón. Preto sú negatívne ióny vodíka hlavným zdrojom nepriehľadnosti (t.j. opacity) fotosfér Slnka a hviezd neskorších spektrálnych typov a formujú rozdelenie energie v kontinuu ich spektier vo viditeľnej a blízkej infračervenej oblasti. Túto skutočnosť veľmi dôležitú pre pochopenie slnečnej fotosféry



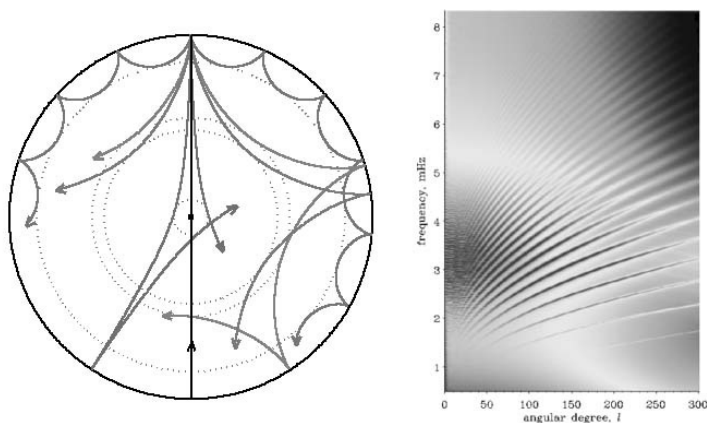
Obr. 13. Snímka slnečného disku získaná pomocou úzkopásmového filtra prepúšťajúceho vo fialovej oblasti slnečného spektra vo vlnovej dĺžke spektrálnej čiary ionizovaného vápnika Ca II K [15]. Slnečné škvrny sú obklopené rozsiahlymi jasnými plážami (t.j. fakulovými poľami pozorovanými v spektrálnej čiare Ca II K). Menšie jasné vlákna sú úseky chromosférickej siete.



Obr. 14. *Vľavo*: Detail slnečnej granulácie a jasných magnetických elementov. Rozmer zorného poľa je približne $4000 \times 4000 \text{ km}^2$ [8, 12]. *Uprostred*: Výsledok numerickej 3D magnetohydrodynamickej simulácie granulácie a povrchového turbulentného dynamika. Rozmer zorného poľa: $4000 \times 4000 \text{ km}^2$ [9]. *Vpravo*: Schematický rez granuláciou naznačujúci stúpajúce horúce prúdy v granulách a klesajúce chladné prúdy v intergranulárnych priestoroch.

zistili v roku 1938 R. Wildt a S. Chandrasekhar. Fotosféra pozorovaná pri vysokom priestorovom rozlíšení mimo škvŕn (obr. 14) má bunkovú štruktúru pripomínajúcu včelí plast, ktorú nazývame granulácia. Stúpajúce konvektívne prúdy (obr. 2) tesne pod fotosférou fragmentujú na menšie bubliny horúcej plazmy, ktoré pozorujeme ako jasné granuly s typickým rozmerom 1000 km a životnosťou 8 až 16 min obklopené tmavými tenšími intergranulárnymi priestormi. Plazma v granulách chladne vyžarovaním svojej energie a horizontálne odteká k okraju granúl do intergranulárnych priestorov odvádzajúcich ako zberné kanály chladnú plazmu späť do vnútra Slnka načerpať novú energiu (obr. 14, panel vpravo). Typická rýchlosť stúpajúcej plazmy v granule je $1\text{--}2 \text{ km s}^{-1}$. Podobné sú aj horizontálne rýchlosti a rýchlosti klesajúcej chladnej plazmy v intergranulárnych priestoroch. Povrch Slnka pokrýva v každom okamihu približne 2,5 milióna granúl. V niektorých intergranulárnych priestoroch sú nápadne vidieť veľmi jasné body (obr. 14, dolná polovica panelu vľavo), ktoré sú koncentraciami veľmi silného magnetického poľa s indukciou $0,1$ až $0,15 \text{ T}$. Tieto magnetické elementy s typickým priemerom 150 km sú produktom slnečného povrchového dynamika, ktoré generuje magnetické pole v dôsledku turbulentných pohybov plazmy v konvektívnych podpovrchových prúdoch. Numerickej simulácie ukazujú, že magnetické elementy môžu byť aj pozostatkom vynárajúcich sa silotrubíc s malým magnetickým tokom, ktoré fragmentovali pôsobením konvekcie na menšie vlákna. Hydrostatická rovnováha magnetických elementov s tlakom okolitej plazmy si vyžaduje vysokú zriedenosť, a teda aj veľkú priehľadnosť plazmy v elementoch, ktoré sú ako rúry skrz ktoré vidíme do hlbších, horúcejších a teda jasnejších vrstiev, z čoho je odvodená relatívne vysoká jasnosť bodov voči okolitej granulácii. V aktívnych oblastiach dochádza ku koncentrovaniu magnetických elementov do väčších jasných ostrovov nepravidelného tvaru nazývaných fotosférické fakulové polia (obr. 6) alebo chromosférické pláže (obr. 13). Konvekcia okrem granulácie vytvára ďalšiu veľkoškálovú dynamickú štruktúru s názvom supergranulácia, ktorá však nie je pozorovateľná ako variácia jasnosti fotosféry, ale je ju možné rozlíšiť buď v rýchlostných alebo magnetických mapách fotosféry. Horizontálne rýchlosti plazmy spôsobené supergranuláciou sú približne 400 m s^{-1} a typický rozmer supergranulárnej bunky je $20\,000 \text{ km}$. Supergranuláciu možno prirovnať k dopravníkovému pásu, ktorý unáša a koncentruje magnetické elementy na hrani-

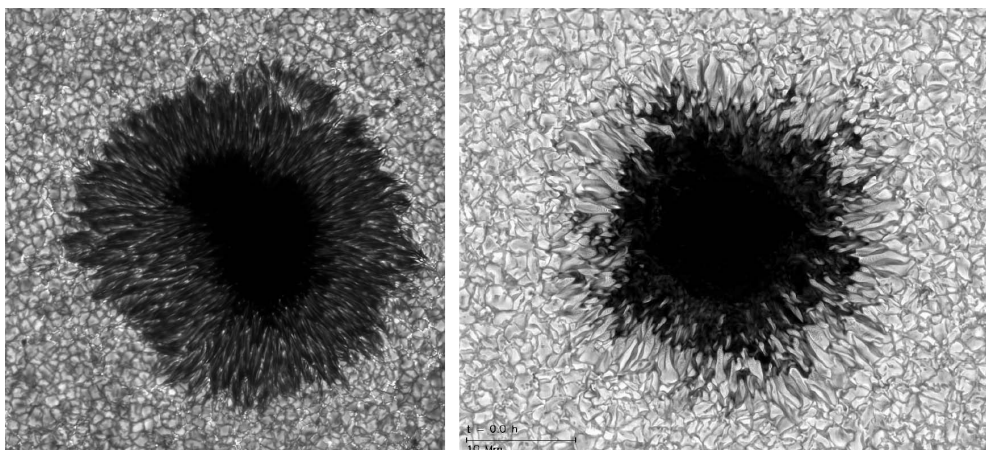
ciach supergranúl, kde vytvárajú takzvanú magnetickú sieť obopínajúcu supergranuly (obr. 13). V magnetickej sieti a v plážach dochádza k premene magnetickej energie na tepelnú, kinetickú a žiarivú v procesoch, ktorým stále celkom dobre nerozumieme. Tieto procesy spôsobujú, že sieť je miestom zvýšeného ohrevu slnečnej atmosféry (obr. 13) aj v jej vyšších vrstvách. Granulácia a činnosť povrchového turbulentného dynama sú teoreticky pomerne dobre zvládnuté oblasti fyziky Slnka. Numerické 3D simulácie verne reprodukovujú štruktúru granulácie a magnetických elementov (obr. 14, panel uprostred). V týchto simuláciách je numericky riešená sústava štyroch vektorových diferenciálnych rovníc magnetohydrodynamiky, a to rovnica kontinua, zákon zachovania hybnosti a hustoty vnútornej energie plynu a Faradayova indukčná rovnica magnetického poľa.



Obr. 15. *Vľavo*: Refrakcia akustických vĺn vo vnútri Slnka a reflexia v povrchových vrstvách. Vlny s kratšou vlnovou dĺžkou prenikajú do menších hĺbok a naopak vlny s väčšími vlnovými dĺžkami prenikajú hlbšie. *Vpravo*: Výkonový diagram fotosférických akustických oscilácií. Tmavé pravidelné hrebene zodpovedajú rezonančným frekvenciám, v ktorých je sústredený najväčší výkon oscilácií [16].

Granulačné pohyby možno prirovnať k piestom náhodne narúšajúcim vyššie stabilné vrstvy fotosféry, v ktorých plazma má istú elasticitu. Granulácia tak generuje široké spektrum akustických oscilácií, pričom fotosféru a Slnko možno prirovnať k rezonančnej skrini, ktorá isté charakteristické frekvencie zosilňuje a naopak iné utlmuje (obr. 15). Najväčší výkon akustických oscilácií je sústredený do oblasti periód okolo 5 min, t.j. 3,3 mHz, ktoré vytvárajú charakteristickú oscilačnú vzorku fotosféry. Akustické vlny sa šíria aj do podpovrchových vrstiev a v dôsledku zmeny stavových veličín v slnečnom vnútri sa ich trajektória v dôsledku refrakcie zakrivuje a tak s istým časovým oneskorením je možné ten istý zákmit pozorovať v priestorovo veľmi vzdialených častiach povrchu Slnka. Štúdiom oscilačných vlastností Slnka sa zaoberá helioseizmológia, ktorá na základe štúdia priestorového a frekvenčného spektra slnečných oscilácií dokáže nahliadnuť do vnútra Slnka a testovať teoretické predpovede o jeho vnútornej stavbe (obr. 15).

Najnápadnejšími fotosférickými štruktúrami sú slnečné škvrny (obr. 16). Ich relatívne nízka jasnosť voči okoliu je dôsledkom ich silného magnetického poľa, ktoré



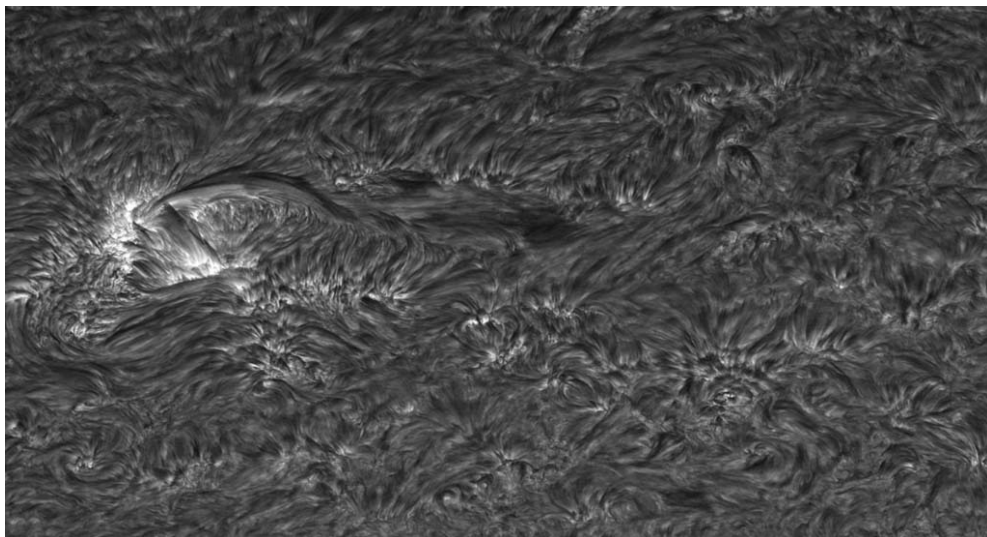
Obr. 16. *Vľavo*: Dobre vyvinutá symetrická škvrna s tmavou umbrou obklopenou svetlejšou vláknitou penumbrou [8, 12]. Priemer škvrny je približne 30 000 km. *Vpravo*: Výsledok 3D magnetohydrodynamickej simulácie slnečnej škvrny a granulácie [5]. Škvrna má priemer približne 20 000 km.

blokuje konvektívne pohyby a prísun energie. Plazma v škvrne je preto voči okoliu chladnejšia ápribližne o 2000 K a teda relatívne menej žiarivá [3]. Veľkým teoretickým problémom v minulosti bola otázka dlhodobej stability škvrny, ktorá by malá byť konvekciou pomerne rýchlo rozptýlená. Jeden z najvýznamnejších pokrokov fyziky Slnka v posledných rokoch bola úspešná 3D magnetohydrodynamická simulácia slnečnej škvrny (obr. 16, vpravo). Dnes vieme, že podstatnú časť celkového magnetického toku Slnka nepredstavujú škvrny, ako by sa zdalo na prvý pohľad, ale naopak malé magnetické elementy, ktorých obrovská početnosť vysoko prevyšuje podiel škvrn na slnečnom magnetizme.

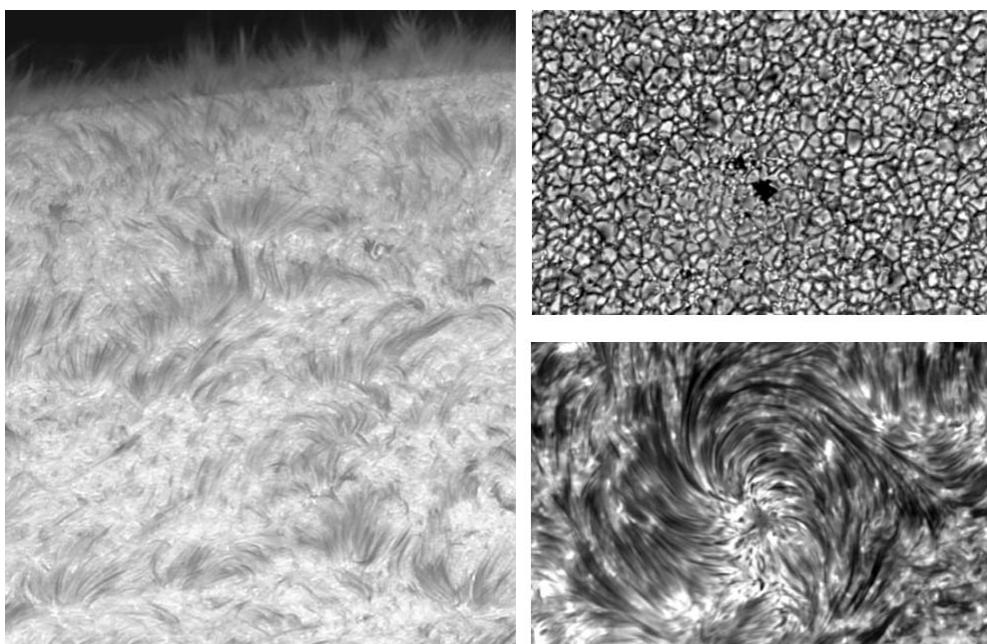
3.3. Chromosféra

Slovo chromosféra je zložené z gréckeho χρωμα, čo je farba, a σφαίρος, t.j. guľa, poukazujúc tak na jasnočervený až purpurový lem svetla nad okrajom Mesiaca krátko pred začiatkom a koncom úplného zatmenia Slnka. Farebný odtieň je zmesou farieb emisných spektrálnych čiar Balmerovej série vodíka, s príspevkom hlavne od najintenzívnejšej čiary H_{α} s vlnovou dĺžkou 656,3 nm v červenej oblasti spektra. Neexistuje úplná definícia chromosféry ako špecifickej zložky slnečnej atmosféry. Jej spodná hranica je pomerne dobre definovaná takzvaným teplotným minimom vo výške asi 500 km nad základňou fotosféry, kde dochádza k narušeniu podmienky žiarivej rovnováhy. Jej horná hranica je na základe hydrostatických planparalelných modelov kladená do výšky približne 2000 km nad základňu fotosféry, no ako ukážeme ďalej, chromosféra je veľmi nehomogénne dynamické prostredie z ktorej vyčnievajú do koróny tenké spikuly (obr. 18) dosahujúce dĺžku až 10 000 km a protuberancie (obr. 21) dosahujúce výšku 50 000 až 100 000 km. Teda slovo sféra v názve je naozaj

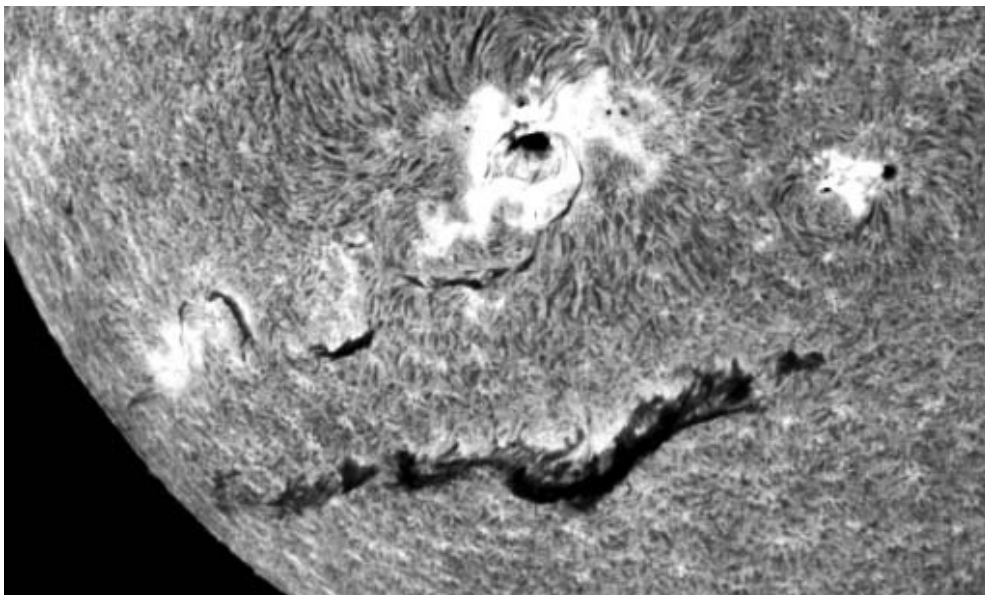
len obrazné. V spomenutom rozsahu výšok 500 až 2000 km teplota stúpa zo 4000 na 7000 K. Emisia v spektrálnej čiare H_{α} a ďalších čiarach Balmerovej série naznačuje, že chromosféra nie je v stave žiarivej rovnováhy, pretože dostatočná obsadenosť spodnej hladiny týchto čiar s energiou 10,2 eV si vyžaduje výdatný zdroj netepelnej energie. Hoci sa hľadanie tohto zdroja označuje ako problém ohrevu chromosféry, nemusí sa jednať o zdroj tepelnej alebo žiarivej povahy. Možnými kandidátmi sú vysokofrekvenčné akustické vlny disipujúce v chromosfére alebo procesy súvisiace s premenou energie magnetického poľa. Vo vizuálnej oblasti spektra chromosféra vyžaruje iba v spektrálnych čiarach Balmerovej série vodíka, v čiarach ionizovaného vápnika Ca II K a H (obr. 13) a v čiare neutrálneho hélia He I D3. V infračervenej oblasti spektra sú pre pozorovania chromosféry k dispozícii triplet Ca II a čiara hélia He I 1083 nm. Ďalšie vhodné čiary a kontinua ležia v ultrafialovej oblasti a na pozorovanie chromosféry v tejto časti spektra sú potrebné kozmické observatóriá. Pre kontinuálne žiarenie fotosféry je chromosféra úplne priehľadná a preto pre jej pozorovania na disku sú potrebné filtre s veľmi úzkym pásmom priepustnosti naladené na niektorú zo spomenutých čiar. Chromosféra je najmenej priezračná a teda najlepšie pozorovateľná v najsilnejšej čiare Balmerovej série vodíka H_{α} 656,3 nm, ktorá je tradične najpoužívanším prostriedkom jej výskumu. Obrázok 17 predstavuje chromosféru pozorovanú v čiare H_{α} . Prevládajúcim štruktúrnym prvkom chromosféry sú tmavé fibrily a scéna je doplnená aktívnou oblasťou vľavo, ktorej fotosférickým náprotivkom je malá skupina škvrín alebo fakulové pole. Pozdĺžny vzhľad fibríl poukazuje na ich súvis s magnetickým poľom. Porovnanie so snímkom fotosféry by ukázalo, že spodné zakončenia fibríl kopírujú hranice magnetickej siete a ležia v blízkosti magnetických elementov (obr. 14). Typická dĺžka fibríl je 2000 až 10 000 km a životnosť 3 až 15 min, pričom pri podskupine takzvaných dynamických fibríl je možné počas ich života pozorovať nápadné predlžovanie a skracovanie rýchlosťami 10 až 30 km s⁻¹. Podľa súčasných predstáv sú dynamické fibrily dôsledkom prenikania fotosférických oscilácií pozdĺž magnetických siločiar do chromosféry, kde sa v dôsledku poklesu hustoty s výškou menia na nelineárne nárazové vlny. Energia disipujúcich nárazových vln vytvára rozsiahly rezervoár ionizovaného vodíka, ktorý rekombinuje nerovnovážne s veľkým oneskorením ešte dlho po prechode nárazovej vlny. Medzi rekombinujúcim vodíkom a obsadenosťou jeho druhej hladiny definujúcej čiaru H_{α} je silná väzba. To dlhodobo zabezpečuje dostatočný počet atómov vodíka s obsadenou druhou hladinou, ktoré rezonančným rozptylom pozadového žiarenia produkujú relatívne tmavé fibrily v už pomerne chladnom prostredí v brázde za nárazovou vlnou. Spikuly, pozorované ako jasné vlásoknicové výtrysky (obr. 18), majú veľmi mnoho podobných vlastností ako fibrily a sú s najväčšou pravdepodobnosťou náprotivkom fibríl pozorovaných na okraji disku. Ich dĺžka nad slnečným okrajom dosahuje až 10 000 km a sú tak obklopené koronálnymi podmienkami. V blízkosti škvrín a pórov sú fibrily podstatne dlhšie (obr. 18 vpravo), čo pravdepodobne súvisí s väčšou magnetickou indukciou a tokom v škvrnách, a ich štruktúra nápadne pripomína štruktúru magnetického poľa tyčového magnetu. Ďalším prvkom aktívnych oblastí pozorovaných na disku v chromosfére sú rozsiahle filamenty, ktoré kopírujú neutrálnu líniu medzi opačnými polaritami magnetického poľa (obr. 19). Filamenty sú projekciou protuberancií (obr. 21) na slnečný disk a sú



Obr. 17. Fibrily a malá jasná aktívna oblasť v chromosfére pozorovanej v spektrálnej čiare $H\alpha$ blízko okraja disku dňa 4.10.2005 pomocou Holandského otvoreného ďalekohľadu [7], [11].



Obr. 18. *Vľavo*: Fibrily a spikuly v spektrálnej čiare $H\alpha$ blízko okraja disku dňa 4.10.2005 pozorované pomocou Holandského otvoreného ďalekohľadu [7], [11]. *Vpravo*: Póry vo fotosfére (horný panel) a nad nimi ležiace chromosférické fibrily (dolný panel) pozorované v infračervenej čiare Ca II [7].



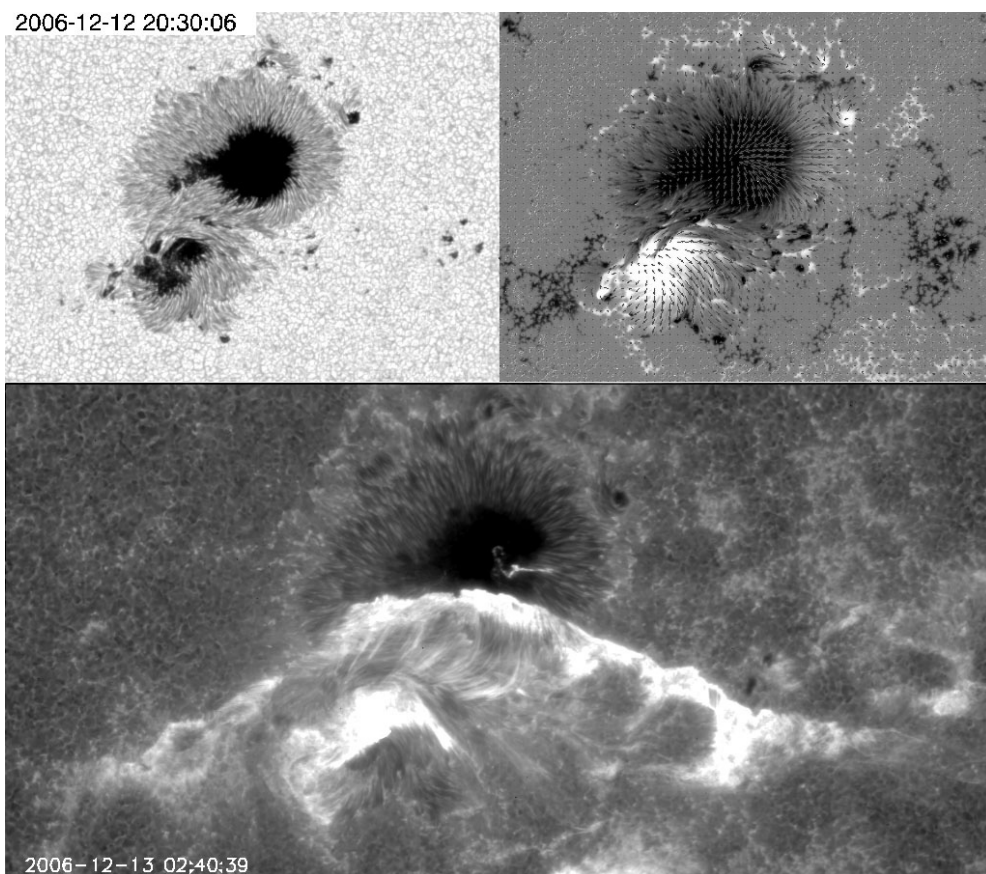
Obr. 19. Tmavý filament a jasná erupcia v okolí škvrny pozorované v čiare H_{α} dňa 11. 6. 2003 blízko okraja disku [2].

to relatívne chladné a husté kondenzácie neutrálneho vodíka, ktorých stabilita je daná štruktúrou magnetického poľa. Filamenty dosahujú dĺžku až 200 000 km a ich životnosť je niekoľko dní až týždňov.

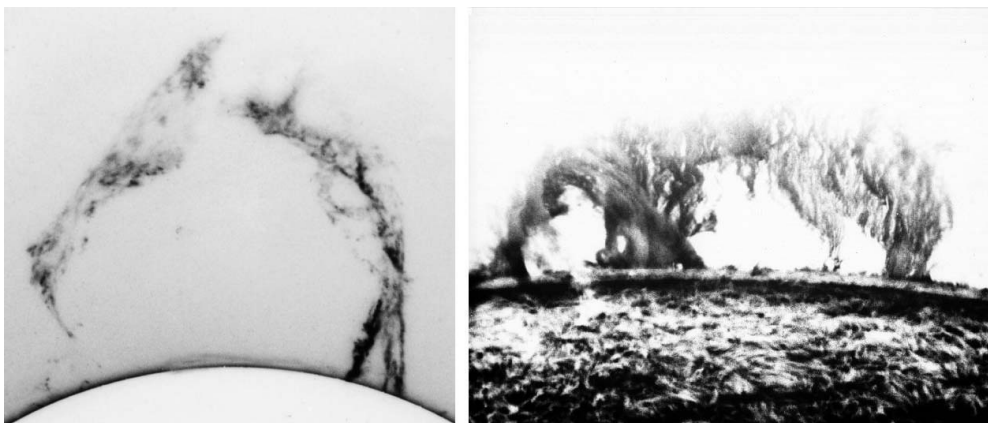
Rýchly a dramatický zánik filamentov je nezriedka sprevádzaný slnečnými erupciami (obr. 19 a 20). Erupcia je prejavom rozsiahlej rekonfigurácie nestabilných magnetických polí v slnečnej atmosfére nad aktívnymi oblasťami, pri ktorej sa veľká časť magnetickej energie premení na kinetickú energiu častíc a v menšej miere je vyžiarená formou vysokoenergetického gama, röntgenového a ultrafialového žiarenia. Energie častíc urýchlených erupciou sú dostatočná na to, aby v hustejších vrstvách iniciovali jadrové reakcie. Celkové trvanie erupcie nepresahuje 30 min a pri najsilnejších sa uvoľní energia až 10^{25} J, čo je len o jeden rád menej ako energia vyžiarená celým Slnkom za sekundu. Je zrejmé, že s početnosťou aktívnych oblastí v maxime slnečného cyklu rastie aj početnosť erupcií (obr. 7 a 8). Pozorovanie erupcie v chromosfére (obr. 19 a 20) je len sekundárnym efektom, keď vysokonergetické protóny a elektróny urýchlené erupciou prenikli do hustejších chromosférických vrstiev. Na druhej strane je erupcia impulzom dramatických zmien v koróne ako ďalšej zložky slnečnej atmosféry. Jej poznávanie začalo pozorovaniami zatmení Slnka a detailný popis koróny bude v príspevku V. Rušina v PMFA č. 3/2009. Erupcia sa v koróne prejavuje emisiou ultrafialového a röntgenového žiarenia (obr. 23) v intervale niekoľko minút až desiatok minút a je často spúšťačom výronu koronálnej hmoty v anglickej literatúre označovaného ako CME (Coronal Mass Ejection).

Ich výskum začal s nástupom koronografov na kozmických slnečných observatóriách v 70.-tych rokoch minulého storočia. Spočiatku prevládala názor, že medzi erupciami

a výronmi je priama príčinná súvislosť a erupcie sú ich jediným spúšťačom. Neskôr sa ukázalo, že len približne 50 až 60 % erupcií má za následok výron koronálnej hmoty. Vznik výronu je však častejšie predznamenaný poerupčnými slučkami, eruptívnym zánikom filamentu (obr. 19) alebo protuberancie a v ojedinelých prípadoch sú výrony pozorované aj v pokojných oblastiach slnečnej atmosféry v minime slnečnej aktivity. Preto sú výrony koronálnej hmoty všeobecnejšie spájané s nestabilnou konfiguráciou a prestavbou magnetického poľa koróny s následným uvoľňovaním jeho magnetickej energie, ktorá sa mení na kinetickú energiu plazmy výronu. Výron koronálnej hmoty je priestorovo expandujúci oblak zvýšenej hustoty plazmy prevažne zloženej z protónov a elektrónov (obr. 23, dolný panel vpravo) s vmrznutým magnetickým poľom pohybujúci sa heliosférou typickou rýchlosťou 300 až 500 km s⁻¹. V extrémnych prípadoch dosahuje rýchlosť výronu hodnotu až 3000 km s⁻¹. Výron koronálnej hmoty dosahuje dráhu Zeme približne po jednom až piatich dňoch po úniku zo Slnka. V čase okolo minima slnečnej aktivity je priemerne pozorovaný 1 výron za deň, pričom v čase

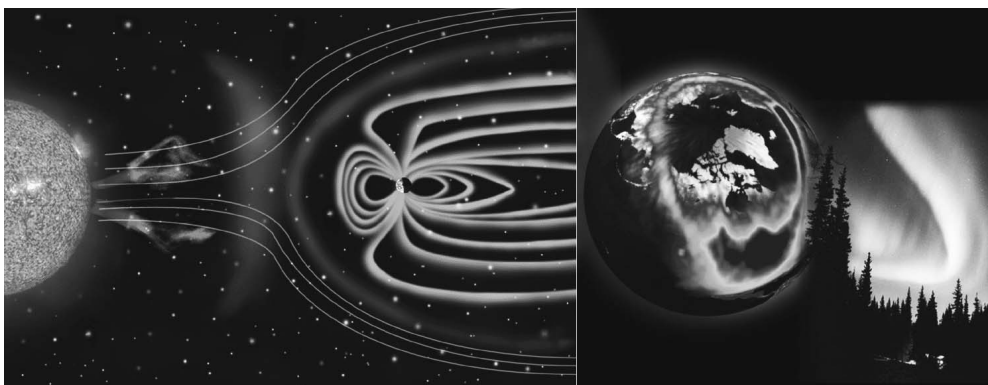


Obr. 20. *Hore*: Bipolárna skupina škvŕn (vľavo) a mapa ich magnetického poľa (vpravo), v ktorej sú opačné polarities znázornené bielou a čiernou. Šípky označujú orientáciu magnetického poľa. *Dole*: Snímka erupcie nad skupinou škvŕn získaná 13. 12. 2006 v chromosférickej čiare Ca II H. Dolná menšia škvŕna je zakrytá zjasnením z erupcie [17].

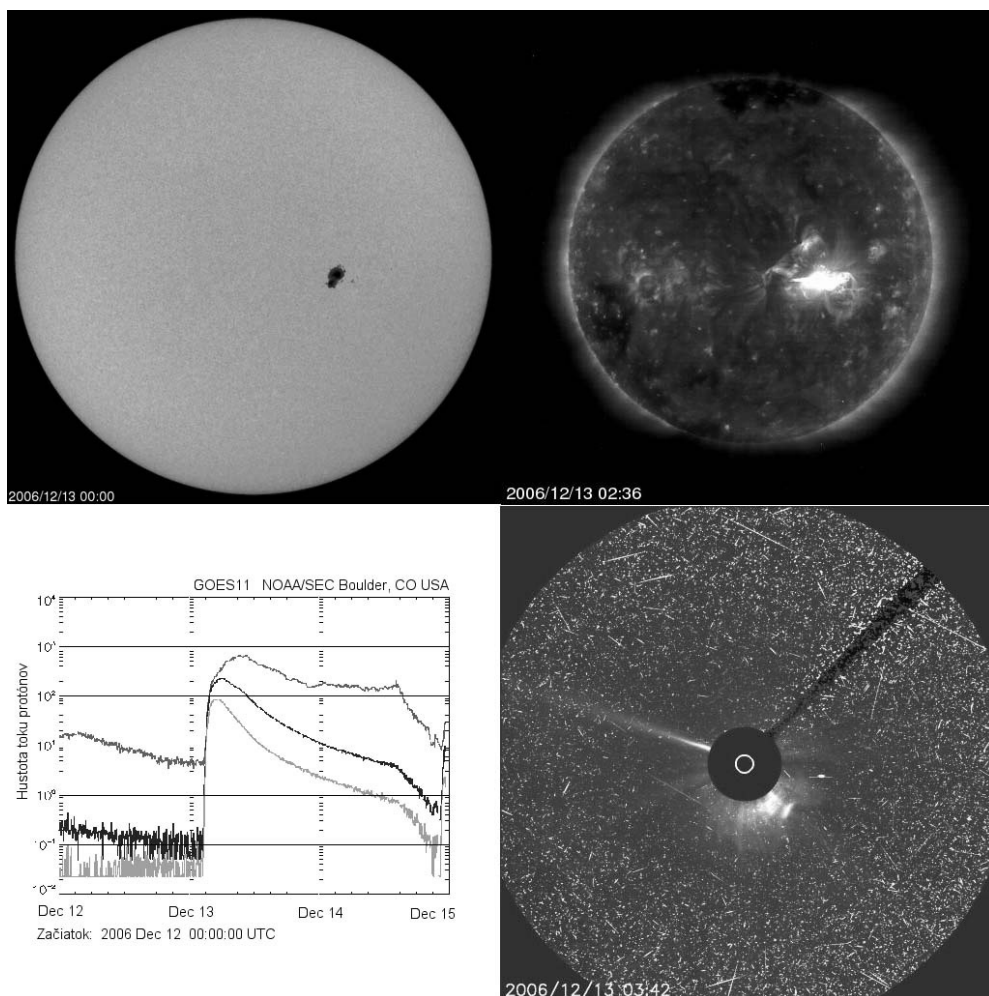


Obr. 21. Protuberancie v spektrálnej čiare H_{α} (negatív).

maxima ich početnosť dosahuje 4 výrony za deň. Výrony sú spolu so slnečným vetrom a kozmickým žiarením hlavnými prvkami takzvaného kozmického počasia v heliosfére a blízkom okolí Zeme. Dôsledky kolízie výronu s magnetosférou Zeme sú podmienené vzájomnou orientáciou magnetického poľa vmrznutého do výronu a geomagnetického poľa. Ak je pole výronu antiparalelné s geomagnetickým poľom, na dennej pologuli Zeme dochádza k ich vzájomnej rekonezii, ktorá je s istým opozdením nasledovaná rekoneziou v kvapkovitom magnetickom chvoste na nočnej pologuli Zeme. To má za následok zvýšenie toku častíc v ionosfére, ktoré sú zdrojom aurorálnej aktivity pozorovanej vo vysokých zemepisných šírkach ako polárna žiara (obr. 22). Ak je pole výronu paralelné s geomagnetickým poľom, rekonezia nastáva len na nočnej pologuli v magnetickom chvoste Zeme a jej dôsledky sú menej výrazné, ako v prvom prípade. Uvedené interakcie magnetického poľa výronu s magnetosférou Zeme sú zdrojom rozsiahlych porúch geomagnetického poľa, ktoré sú merateľné aj na povrchu a označované ako magnetické búrky. Toto označenie je silne obrazné, nakoľko počas typickej magnetickej



Obr. 22. Prepojený systém koróna – heliosféra – magnetosféra – ionosféra. Výron korónálnej hmoty ako prvok kozmického počasia a spúšťač aurorálnej aktivity.



Obr. 23. Koronálne a heliosférické dôsledky erupcie z dňa 13.12.2006 (obr. 20). V smere hodinových ručičiek: Škvrny vo fotosfére. Jasná erupcia v koróne pozorovanej v extrémnej ultrafialovej oblasti zodpovedajúcej teplotám 1,6 milióna K. Výron koronálnej hmoty CME pozorovaný kozmickým koronografom. Zrnenie je spôsobené sprážkou vysokoenergetických častíc urýchlených erupciou. Slnko je zakryté kruhovou maskou [16]. Nárast hustoty toku protónov v dôsledku erupcie v blízkosti Zeme meraný satelitom GOES [18].

búrky sa geomagnetické pole mení len o malý zlomok percenta. Výrony koronálnej hmoty môžu byť oveľa citelnejšie pre technosféru ako systém prostriedkov umožňujúci fungovanie modernej informačnej spoločnosti. Vysokoenergetické častice výronu urýchľujú starnutie solárnych panelov satelitov životne dôležitých pre ich fungovanie a spôsobujú poruchy ich elektroniky. Dôsledkom výronu sa mení štruktúra ionosféry, čo môže zapríčiniť rádiokomunikačné problémy leteckých liniek v oblasti pólův. Poruchy magnetosféry môžu indukovať nebezpečne vysoké prepätia v transformátoroch, na vysokonapäťových elektrických vedeniach a urýchľovať koróziu diaľkových plynovodov

a ropovodov v polárnych oblastiach. Sú známe prípady poruchy železničných traťových systémov, ktoré sú dávané do súvislosti s geomagnetickou búrkou vyvolanou výronom koronálnej hmoty. Preto je včasné a účinné predpovedanie výskytu a dôsledkov výronov koronálnej hmoty jednou z najdôležitejších úloh fyziky Slnka v nasledujúcom 24. cykle slnečnej aktivity.

PodĎakovanie: Táto práca bola podporená grantom Agentúry na podporu výskumu a vývoja LPP-0068-06.

Literatúra a internetové zdroje

- [1] ANTIA, H. M., BHATNAGAR, A., ULSCHNEIDER, P.: *Lectures on Solar Physics*. Springer, Berlin, 2003.
- [2] DENKER, C., NAQVI, M., DENG, N., TRITSCHLER, A., MARQUETTE, W. H.: *Synoptic Observing at Big Bear Solar Observatory*. In: The Physics of Chromospheric Plasmas, 2007, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 368, eds. Heinzel, P., Dorotovič, I., Rutten, R. J., 515.
- [3] FOUKAL, P. V.: *Solar Astrophysics*. 2nd Revised Edition, Wiley-VCH, 2004.
- [4] LANG, K. R.: *The Sun from Space*. 2nd Edition, Springer, Berlin, 2009, str. 134.
- [5] REMPEL, M., SCHÜSSLER, M.: *3D MHD Simulations of Sunspot Structure*. 12th European Solar Physics Meeting, Freiburg, Germany, September, 8–12, 2008, online na <http://espm.kis.uni-freiburg.de/>, 3.9.
- [6] RUTTEN, R. J., HAMMERSCHLAG, R. H., BETTONVIL, F. C. M., SÜTTERLIN, P., DE WIJN, A. G.: *DOT tomography of the solar atmosphere*. I. Telescope summary and program definition, *Astronomy & Astrophysics*, 413, 2004, 1183–1189.
- [7] RUTTEN, R. J.: *Observing the Solar Chromosphere*. In: The Physics of Chromospheric Plasmas, 2007, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 368, eds. Heinzel, P., Dorotovič, I., Rutten, R. J., 27.
- [8] SCHARMER, G. B., BJELKSJO, K., KORHONEN, T. K., LINDBERG, B., PETTERSON, B.: *The 1-meter Swedish solar telescope*. SPIE Conference Series, eds. Keil, S. L., Avakyan, S. V., 4853, 2003, 341–350.
- [9] SCHÜSSLER, M., VÖGLER, A.: *Strong horizontal photospheric magnetic field in a surface dynamo simulation*. *Astronomy & Astrophysics*, 481, 2008, L5–L8.
- [10] *Solar Influences Data Analysis Center*. <http://sidc.oma.be/>.
- [11] *Dutch Open Telescope*. <http://dot.astro.uu.nl/>.
- [12] *Swedish 1-m Solar Telescope*. <http://www.solarphysics.kva.se/>.
- [13] *National Astronomical Observatory of Japan*. <http://solarwww.mtk.nao.ac.jp>.
- [14] *Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos*. World Radiation Center, <http://www.pmodwrc.ch>.
- [15] *Precision Solar Photometric Telescope*. http://lasp.colorado.edu/pspt_access/.
- [16] *Solar and Heliospheric Observatory*. <http://sohowww.nascom.nasa.gov>.
- [17] *Hinode*. <http://solar-b.nao.ac.jp>.
- [18] *SolarMonitor*. <http://www.solarmonitor.org/>.