

Prechodová vrstva medzi slnečnou chromosférou a korónou

Ján Rybák, *Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, choc @astro.sk*

Abstrakt

Príspevok uvádza základné poznatky o prechodovej vrstve medzi slnečnou chromosférou a slnečnou korónou, ktorá je doteraz menej známou časťou slnečnej atmosféry. Tieto poznatky vedú k poopraveniu štandardnej predstavy o delení atmosféry Slnka na fotosféru, chromosféru a korónu začlenením prechodovej vrstvy ako jej štvrtej zložky. Zdôraznené sú tie poznatky o morfológii a dynamike prechodovej vrstvy a fyzikálnych podmienkach, panujúcich v prechodovej vrstve, ktoré súvisia s ohrevom slnečnej koróny.

1. ÚVOD

Všetky základné popularizačné publikácie, vydávané v slovenčine či v cudzích jazykoch, ktoré sa zaoberajú Slnkom uvádzajú, že atmosféra Slnka, t.j. oblasť nad jeho pomyselným povrchom, sa skladá z troch vrstiev - fotosféry, chromosféry a koróny. Táto štandardná predstava, ktorá vznikla ešte v prvej polovici minulého storočia, je už dlho šírená na Slovensku v popularizačných prácach a prednáškach. Avšak hlavne vďaka možnosti pozorovať Slnko v ultrafialovej oblasti elektromagnetického spektra z družíc, nachádzajúcich sa nad zemskou atmosférou, výskum Slnka s postupujúcim časom za posledné desaťročia výrazne pokročil. Niektoré z výsledkov výskumu slnečnej atmosféry boli tak zásadne, že výrazne poopravili spomínanú štandardnú predstavu o členení slnečnej atmosféry. Rozdiel v predstave o slnečnej atmosfére, ktorý sa takto vytvoril medzi poznatkami, dosiahnutými vďaka najnovšiemu profesionálnemu výskumu Slnka, a medzi obsahom popularizačných aktivít sa tak stal v posledných dvoch desaťročiach naozaj výrazným.

Tento rozdiel by nebol tak vážnym nebyť masového rozšírenia internetu. Vďaka nemu sú dnes dostupné (často skoro v reálnom čase) obrázky Slnka, z ktorých sa niektoré ani zďaleka nepodobajú tomu vesmírnemu objektu, ktorý poznáme z jeho romantických východov či západov, ba dokonca ani z kresieb slnečných škvŕn. Prekvapujúco sa tieto obrázky Slnka nepodobajú ani na obrázky slnečnej koróny, známej z mnohých publikácií či z výletu za úplným zatmením Slnka v auguste 1999 do krajín susediacich so Slovenskom. V tomto príspevku sa pokúsime načrtnúť hlavné zmeny, ktoré sa v poslednom čase udiali s našou predstavou o morfológii slnečnej atmosféry a o fyzikálnych procesoch, ktoré prebiehajú hlavne na rozhraní medzi slnečnou chromosférou a korónou.

2. PREČO TO KOMPLIKOVAŤ ?

Je ale naozaj nevyhnutné poopraviť štandardnú predstavu o slnečnej atmosfére ? Je táto naozaj iná stále, alebo len vtedy keď sú v nej prítomné aktívne oblasti či erupcie ? Pekným príkladom toho, že slnečná atmosféra nespĺňa túto štandardnú predstavu ani i v prípade úplne pokojného stavu, teda mimo všetkých známych aktívnych javov prebiehajúcich na povrchu Slnka, je obdobie slnečného minima medzi 22. a 23. slnečným cyklom, ktoré nastalo na prelome leta a jesene 1996. Vtedy bolo Wolfovo relatívne číslo rovné nule po viac ako 40 dní. Napriek tomu indexy, udávajúce emisiu slnečnej koróny (koronálny index z meraní zelenej koronálnej emisnej čiary, slnečný rádiový tok na frekvencii 2800MHz), jednoznačne dokazujú nízku ale nenulovú úroveň žiarenia, uvoľňovaného v slnečnej koróne. Do koróny teda musela byť energia neustále dodávaná. Navyše, hoci na slnečnom povrchu vtedy neboli žiadne aktívne oblasti (dokonca ani žiadne malé škvŕny), obrázky Slnka získané z toho obdobia prístrojom EIT/SOHO (pásmo 171 Å) ukazujú, že slnečná koróna bola dokonca nehomogénna a jej žiarenie bolo emitované pred slnečným diskom z izolovaných oblastí (obr. 1). Merania viacerých družíc zároveň dokazujú, že i v tomto čase prúdil zo Slnka tok častíc, nazývaný slnečným vetrom. Sonda Ulysses, nachádzajúca sa v tom čase vo vzdialenosti 4 astronomických jednotiek od Slnka s inklináciou dráhy viac ako 35 stupňov, zaznamenala tok častíc o rýchlostiach 400-600 km/s a hustote viac ako 1 protón/cm³.

Pretože vieme, že teplota povrchu Slnka je menej ako 6000K a že ako zelená emisná čiara koróny tak i ultrafialové emisné čiary Fe IX/X pri 171 Å vznikajú len pri teplotách vyšších ako 1 milión K, stojíme pred záhadou, nazývanou dnes problémom ohrevu koróny. Porovnávajúc zas pohyby plazmy v slnečnej fotosfére, ktoré sú pomalšie ako 10 km/s, s rýchlosťami slnečného vetra (a jeho hustotou), spomínaný problém musíme rozšíriť o ďalší problém urýchľovania častíc slnečného vetra. Slnečná fyzika tak potrebuje vysvetliť, prečo je 'pec'

(slnčný povrch) chladnejšia ako 'izba' (koróna), ktorú pec vyhrieva, hoci vieme, že niet iného zdroja energie ako táto 'pec'. Navyše by bolo výborné, keby vysvetlenie problému 'pece chladnejšej ako izby' súčasne objasňovalo, prečo 'gulka vystrelená z pušky' (častica slnečného vetra) počas letu zvyšuje svoju rýchlosť. Alebo žeby bola 'gulka' stále v hlavni tej 'pušky'? Trochu presnejšie, potrebujeme vysvetliť ako, a vďaka akým fyzikálnym procesom, sú spojené dva tak extrémne rozdielne fyzikálne prostredia akými sú slnečná fotosféra a koróna (Rybanský, 2000).

3. 1D MODEL SLNEČNEJ ATMOSFÉRY

Prvé pokusy o najdenie priebehu fyzikálnych parametrov medzi slnečnou fotosférou a korónou a procesov, ktoré takýto priebeh spôsobujú, boli urobené na základe spektrálneho rozloženia intenzity elektromagnetického žiarenia, prichádzajúceho zo Slnka. Dostatočne presné absolútne merania v širokom rozsahu energií od krátko ultrafialového žiarenia až po milimetrové rádiové žiarenie boli získané v 70-tych rokoch minulého storočia (obr. 2). Vernazza a kol. (1981) vypočítali na ich základe priebeh teploty a ostatných fyzikálnych parametrov v slnečnej atmosfére (obr. 3), ktorý ale pripravili za istých ohraničujúcich predpokladov. Z týchto predpokladov za najdôležitejší môžeme považovať predpoklad o 1-rozmernej (1D) radiálnej závislosti fyzikálnych veličín. Tento model dosiahol dobrú zhodu s pozorovaniami (obr. 2) a popísal výškovú stratifikáciu tvorenia spektrálnych čiar v slnečnej atmosfére (obr. 3).

Prekvapivým výsledkom modelu bol prudký nárast teploty na hornej hranici chromosféry. Len pomocou neho bolo možné vysvetliť pozorované intenzity najvýraznejších emisných čiar v ultrafialovej oblasti slnečného spektra, napr. čiary HILyman alfa. Rozšírenie tohoto modelu až do koróny, založené na ďalších teoretických predpokladoch (napr. Mariska, 1992) ukázalo, že priebeh teploty zistený Vernazzom a kol. (1981) pokračuje i ďalej do koróny. Prudký nárast teploty až skoro k miliónu Kelvinov musí byť za prijatého predpokladu hydrostatickej rovnováhy navyše kompenzovaný rovnako prudkým poklesom hustoty plazmy (obr. 4).

4. PRECHODOVÁ VRSTVA

Výraznosť zmeny teploty a hustoty plazmy na rozhraní chromosféry a koróny viedla k potrebe označiť túto vrstvu slnečnej atmosféry vlastným názvom, pričom sa zaužíval pojem prechodová vrstva ('transition region'). Jej radiálny rozsah, odvodeným z 1D modelov, je len $1 - 3 \times 10^3$ km, pričom v nej má prebiehať nárast teploty z 2×10^4 K na 1×10^6 K a pokles hustoty z 10^{-12} g/cm³ až na 10^{-15} g/cm³ pri súčasnom poklese hustoty voľných elektrónov z 10^{10} cm⁻³ na 10^8 cm⁻³. Významnosť tejto vrstvy je

zdôraznená tým, že práve cez ňu prechádza celý tok energie, ktorou je nahrievaná plazma v koróne, ako i tok hmoty, ktorý dopĺňa plazmu do koróny, odkiaľ je stále slnečným vetrom unášaná do medziplanetárneho priestoru. Prechodová vrstva je i tou vrstvou v atmosfére, kde sa mení pomer hustoty energie plazmy a magnetického poľa. Pohyb plazmy je pod prechodovou vrstvou ovládaný prevažujúcou hustotou energie plazmy a tak pohyb plazmy 'ovláda' pohyb magnetického poľa, no nad ňou je už vplyv magnetického poľa dominantný a magnetické pole kontroluje pohyb plazmy v koróne.

5. VIDIEŤ PRECHODOVÚ VRSTVU ?

Plazma v prechodovej vrstve sa za spomínaných fyzikálnych podmienok skladá výlučne z iónov a voľných elektrónov pričom hlavnými atomárnymi procesmi, ktoré vplyvajú na stav plazmy sú ionizácia atómov (iónov) zrážkami, rekombinácia iónov a elektrónov žiarením a spontánna emisia iónov (Mariska, 1992). Vďaka svojej dostatočne nízkej hustote je plazma pre žiarenie, uvoľňujúce sa v prechodovej vrstve ľubovoľným dovoleným prechodom elektrónu z excitovanej na nižšiu hladinu, opticky tenkým prostredím. Preto sú profily všetkých emisných čiar, vznikajúcich v prechodovej vrstve, veľmi málo odlišné od gaussovského profilu. Všetky spektrálne čiary, ktoré v nej vznikajú, sa ale nachádzajú v ultrafialovej oblasti slnečného spektra (obr. 5). Ukážka časti spektra, v ktorej sa nachádzajú ako čiary chromosféry tak i prechodovej oblasti je zobrazená na obr. 6. Hlavným fyzikálnym mechanizmom, ktorý spôsobuje pozorované rozšírenie profilov čiar do gaussovského tvaru je rozšírenie zrážkami. Ióny sa totiž termálne pohybujú pričom rozdelenie početnosti iónov podľa ich rýchlostí má maxwellovský priebeh (Mariska, 1992). Emisia fotonov z pohybujúcich sa atómov je potom vďaka dopplerovmu javu posunutá voči laboratórnej vlnovej dĺžke prechodu, a tak integrál tejto emisie od všetkých pozorovaných iónov vytvára gaussovský profil čiar. Emisia iónov z prechodovej vrstvy už nie je znova absorbovaná, keďže prostredie je pre čiary opticky tenké a preto gaussovský profil už nie je ovplyvňovaný. Okrem tohoto termálneho rozšírenia spektrálnych čiar ale navyše pozorujeme dodatočné rozšírenie čiar (tieto sú širšie ako by zodpovedalo ionizačnej teplote iónov), spôsobované nerozlíšenými pohybmi plazmy netepelnej povahy, napr. vlnením. Každú spektrálnu čiaru prechodovej oblasti môžeme po aproximácii gaussovým profilom reprezentovať trojicou parametrov: centrálnou intenzitou čiar, dopplerovským posunom čiar a šírkou čiar, resp. netermálnym rozšírením čiar. Tieto parametre hovoria nielen o prítomnosti daného atómu v slnečnej atmosfére, ale i o existencii podmienok vhodných pre existenciu daného iónu a emisie v danom prechode, o rýchlosti pohybu emitujúcej plazmy a o nerozlíšených pohyboch v plazme.

Dnešné prístroje používame nielen pre meranie spektrálnych profilov čiar vznikajúcich v prechodovej vrstve ale i pre vytváranie spektroheliogramov Slnka v týchto čiarach. Práve tieto, dnes tak ľahko dostupné, obrázky ukazujú Slnko také, aké ho nepoznáme z populárnej literatúry (obr. 7). (Ukážky mnohých

podobných obrázkov sú i na domovských stránkach spektrometrov SUMER (www.linmpi.mpg.de/english/projekte/sumer/), CDS (solg2.bnsc.rl.ac.uk/) či družice SOHO (sohowww.nascom.nasa.gov)). Bohužiaľ z uvedeného vyplýva, že hoci síce prechodovú vrstvu vidieť, sledovať ju možno len vďaka prístrojom umiestneným nad zemskou atmosférou, ktorá pohlcuje všetko UV žiarenie, ktoré prechodová vrstva vyžiari.

Len na okraj : hoci boli prvé spektrá prechodovej vrstvy získané až v 50-tych rokoch minulého storočia z balónov a družíc, historicky prvými, kto zaznamenali žiarenie emisných čiar vytváraných rovnakým mechanizmom ako v prechodovej vrstve Slnka však boli už pred skoro 150 rokmi Higgins a Miller (1864), ktorí pozorovali emisné čiary planetárnych hmlovín.

6. 1D MODEL - 2D REALITA

Spektroheliogramy podobné tomu na obr. 7 ukázali už dávnejšie (hlavne tie získané počas projektu SKYLAB), že štruktúra prechodovej vrstvy súvisí so štruktúrou supegranúl, ako ju poznáme zo slnečnej chromosféry. Okrem toho porovnanie 2D štruktúry prechodovej vrstvy s magnetogramami, získanými z pozorovaní slnečnej fotosféry, ukázali že zjasknenia emisie prechodovej oblasti súvisia s tými miestami vo fotosfére, kde pozorujeme ani nie tak zvýšené koncentrácie magnetického toku ako skôr blízkosť opačných polarít magnetického poľa (napr. Dowdy a kol., 1986). Tieto observačné zistenia viedli v kombinácii s teoretickými predpokladmi o termodynamických pomeroch vo vonkajšej atmosfére Slnka, prevzatými z 1D modelov atmosféry, k vytvoreniu nových modelov, ktoré v dvoch priestorových rozmeroch (horizontálnom a vertikálnom) navrhli štruktúru atmosféry Slnka výrazne rozdielnu od predošlého 1D modelu.

Prvý 2D model prechodovej oblasti publikoval Gabriel (1976). V tomto modeli je supergranulačná štruktúra akosi 'chrbitou' prechodovej vrstvy. Priestor prechodovej vrstvy je tvorený statickými 'lievikmi', vytváranými magnetickým ym poľom. Vo fotosfére je totiž vynárajúci sa magnetický tok unášaný pohybom plazmy k okrajom supergranuly, kde sa vytvárajú zväčša izolované unipolárne oblasti. Tieto oblasti podľa Gabriela smerujú ako unipolárne polia i smerom do koróny, kde sa výrazne rozširujú z pôvodne veľmi úzkeho prierezu vo fotosfére až na rozmer porovnateľný s rozmerom supergranúl a tak v koróne vyplňajú jej celý objem (obr. 8). Model je založený na predpoklade rovnováhy tlaku plazmy a magnetického tlaku vo všetkých vrstvách slnečnej atmosféry a sú v ňom zahrnuté radiačné straty energie vďaka emisii v UV oblasti slnečného spektra.

Rozmery oblastí so zvýšenou emisiou plazmy v prechodovej vrstve by sa mali podľa tohoto modelu s rastúcou teplotou smerom do koróny postupne zväčšovať. Tento záver bol potvrdený viacerými

pozorovaniami. Príkladom sú i spektroheliogramy ilustrované na obr. 9, kde pôvodná supegranulačná štruktúra v emisii s teplotou 20000 K sa mení na rozmernejšie štruktúry prechodovej vrstvy (250000 K) a ďalej na typickú koronálnu štruktúru. Model úspešne vysvetlil rozmery prechodovej oblasti v rôznych teplotách, jej súvis s magnetickým poľom i supergranulačnou štruktúrou, ako aj kontrast medzi prechodovou vrstvou vo vnútri a na hranici supergranulácie. Naopak model nebol schopný vysvetliť pozorovanú úroveň intenzity v dolných vrstvách prechodovej oblasti a neuvažoval o existencii bipolárnych magnetických polí.

Tieto nedostatky sa podarilo neskôr vysvetliť Dowdymu a kol. (1986), ktorí rozšírili model navrhnutý Gabrielom, skladajúci sa z 'lievikov' unipolárneho magnetického poľa, o 'slučky' vytvárané nad bipolárnymi magnetickými oblasťami vo fotosfére. Tieto 'slučky' však majú mať oveľa menšie rozmery ako typické slučky v aktívnych oblastiach a majú sa nachádzať hlavne na hraniciach supergranúl (obr. 10). V 'lievikoch' predpokladajú rovnováhu tlaku plazmy a magnetického tlaku zatiaľ čo 'slučky' by mali byť izotermálne, ale vo všeobecnosti môžu byť tieto v širokom rozsahu teplôt. Teplota 'lievikov' by mal byť vyššia ako teplota v 'slučkách'. Tento model už viedol k pozorovanej úrovni intenzity emisie pri teplotách pod 10^5 K. Stálym negatívnym modelom však bol naďalej predpoklad stacionárnosti všetkých štruktúr v prechodovej vrstve.

7. 2D REALITA A FYZIKÁLNA DIAGNOSTIKA

Vďaka kvalitným pozorovaniam spektrálnych profilov prechodovej vrstvy, získaným spektrometrom SUMER (Wilhelm, 1995, pozri i Rybák a kol., 1998; 2000) sa podarilo výrazne pokročiť v skúmaní fyzikálnych podmienok panujúcich v prechodovej oblasti pokojného Slnka. Peter (2001) využil dostatočne kvalitné profily emisných čiar, vznikajúce v širokom rozsahu teplôt, na overenie zhody nameraných profilov spektrálnych čiar s teoretickým gaussovským profilom. Zistil, že hoci vo vnútri supergranúl sú profily čiar v celom rozsahu teplôt $4,0 \times 10^4$ K – $6,3 \times 10^5$ K gaussovské, na hraniciach supergranúl sú profily týchto čiar veľmi rozdielne od gaussovského profilu (od teploty $6,0 \times 10^4$ K). Ak ale tieto profily aproximoval súčtom dvoch gaussovských profilov, dostal takú istú kvalitnú zhodu s meraniami ako v prípade vnútra supergranuly a aproximácie len jedným gaussovským profilom (obr. 11).

Keďže šírka a centrálna intenzita týchto dekomponovaných gaussovských profilov sú vo všetkých čiarach výrazne rozdielne - centrálny intenzívnejší profil je užší a druhý profil, ktorý je menej intenzívny je vždy podstatne širší, Peter (2001) interpretoval tieto dekomponované profily ako emisie vznikajúce v rôznych štruktúrach, v ktorých panujú rôzne fyzikálne podmienky. Lieviky, navrhnuté Gabrielom (1976) a Dowdym a kol. (1986), emitujú podľa modelu Petera (2001) (obr. 11) širšiu a slabšiu gaussovskú komponentu pozorovaných profilov. Väčšie rozšírenie týchto čiar je vysvetľované nie vyššou teplotou (tá je približne rovnaká ako nad vnútrom

supergranúl v prechodovej vrstve, hoci v inej geometrickej výške), ale zväčšeným netermálnym rozšírením čiar.

Keďže závislosť netermálneho rozšírenia čiar na teplote formovania čiar bola zistená ako úmerná štvrtej odmocnine teploty tvorenia čiar (Peter, 2001), fyzikálnym mechanizmom spôsobujúcim toto rozšírenie čiar by mohli byť Alfvénove vlny, v prípade ktorých teória vedie práve k takejto závislosti rozšírenia čiar na teplote. Je zaujímavým faktom, že odhadovaný tok energie, ktorý by vďaka týmto vlnám mal do koróny prúdiť v 'lievikoch', je úplne dostatočný na ohrev koróny pokojného Slnka. Avšak mechanizmus, ktorý by energiu Alfvénových vln previedol v koróne dostatočne efektívne do formy tepelnej energie nebol doteraz úspešne navrhnutý.

8. PÁD PRECHODOVEJ VRSTVY ?

Napriek tomu, že model Petera (2001) už fyzikálne dostatočne presne vysvetľuje pozorovanú štruktúru prechodovej oblasti ako i intenzity a šírky pozorovaných spektrálnych čiar, poznatky o dopplerovskom posune týchto čiar, ktoré boli doteraz zistené, stále postrádajú jednoznačné a uspokojivé vysvetlenie. Merania dopplerovských posunov emisných čiar prechodovej vrstvy, robené opakovaním viacerými prístrojmi totiž jednoznačne ukázali, že tieto čiary sú systematicky posunuté do červenej oblasti spektra voči svojim laboratórnym polohám. To by znamenalo, že všetka hmota prechodovej oblasti sa od nás vzdaluje, a preto padá dolu na slnečný povrch rýchlosťami až 10 km/s (obr. 13). To by znamenalo, že buď je hmota do prechodovej oblasti stále dodávaná iným spôsobom, ktorý v UV spektre nie je viditeľný, alebo tento pád plazmy nie je reálny, keďže prechodovú vrstvu je možné pozorovať stále. Navyše pôvodne v žiadnej z čiar, vznikajúcich v prechodovej vrstve či koróne, neboli zaznamenané priemerné rýchlosti smerujúce k pozorovateľovi, ktoré by indikovali slnečný vietor už v plazme s teplotou okolo 1 milión K. Novšie pozorovania (obr. 13, zvislé čiarky) však predsa ukázali, že po dostatočne presnej kalibrácii spektier na vlnové dĺžky, plazma s teplotou viac ako $5,0 \times 10^5$ K sa už pohybuje tým želaným smerom k Zemi, a tak môžeme oblasť vzniku slnečného vetra situovať do teplotného režimu hornej časti prechodovej vrstvy. Rozhodnúť ale o tom, ako sa vytvára 'zдание' o páde prechodovej vrstvy Slnka na jeho povrch, alebo uspokojivo navrhnuť spôsob ako do prechodovej vrstvy stále hmotu dopĺňať sa doteraz nepodarilo. Mariska (1998) navrhol mechanizmus asymetrického ohrevu a sifónového toku plazmy v koronálnych slučkách, no tento mechanizmus nebol zatiaľ observačne potvrdený. Inou možnosťou, navrhnutou Chengom (1992a,b) je návrat spikulárneho materiálu, ktorý sledujeme stúpať v spikulách (napr. viditeľný v čiare H alfa) pri teplotách o rád nižších ako sú teploty v prechodovej vrstve. Ďalšou možnosťou by mohol byť mechanizmus navrhnutý Hansteenom a kol.

(1997), ktorí predpokladajú, že pohyby silotrubíc magnetického poľa v koróne a prechodovej vrstve sú zdrojom nanoerupcií, t.j. v porovnaní s klasickými erupciami veľmi malými uvoľneniami energie magnetického poľa do tepelnej energie vďaka magnetickej rekonezii.

9. VARIABILITA A MIMORIADNE JAVY

Opisované poznatky a predstavy o prechodovej vrstve pokojného Slnka, ktorým sme sa doteraz venovali, sú však statické. Sú založené na pozorovaniach, ktoré neberú do úvahy časové zmeny prebiehajúce v prechodovej vrstve. Novšie pozorovania však ukazujú, že práve prechodová vrstva je časťou slnečnej atmosféry s viacerými mimoriadne aktívnymi javmi. Tieto javy spôsobujú, že napríklad profily spektrálnych čiar pozorované v UV oblasti, pri podrobnejšom zázname s lepším časovým a priestorovým rozlíšením vykazujú výrazné časové zmeny (obr. 14). Zaujímavosťou je, že tieto zmeny profilov čiar sú najvýraznejšími zmenami profilov čiar tvoriacich sa v pokojnej slnečnej atmosfére bez ohľadu akú časť atmosféry berieme do úvahy.

Jeden typ javov, nazývaný 'eruptívnym javom' (angl. eruptive event) vykazuje výrazné zložené profily čiar, skladajúce sa z viacerých gaussovských komponent z dopplerovskými posunmi až 100 km/s. Niektoré z pozorovaní týchto javov nasvedčujú tomu, že ich príčinou sú dvojsmerné prúdy plazmy, šíriace sa tak vysokými rýchlosťami vďaka uvoľneniu energie procesom rekonezie magnetického poľa (napr. Innes a kol., 1997). Druhým typom je 'zjasnenie' (angl. blinker), jav ktorý nie je sprevádzaný tak vysokými rýchlosťami plazmy ale len zvýšením emisie v čiarach, vznikajúcich v prechodovej oblasti. Príklad takehto javu je ukázaný i príspevku Tomasza a kol. v tomto zborníku (2002). Pozorovania ukazujú, že sa pravdepodobne jedná o jav spôsobený zvýšením hustoty plazmy v mieste javu v prechodovej vrstve (Harrison, 1997). Okrem týchto typov javov sa historicky, hlavne vďaka pozorovaniam, začali používať i ďalšie názvy pre prejavy aktivity v pokojnej slnečnej atmosfére, napr. jasné body (bright points), či sa jedná o iný fyzikálny mechanizmus spôsobujúci tento jav, alebo sa jedná len o iný prejav rovnakého mechanizmu, nie je zatiaľ vyjasnené. Dostatok dát získaných v dnešnej dobe hlavne vďaka sonde SOHO by však mal umožniť objasniť viaceré aspekty mimoriadnych javov, ktoré spôsobujú tak výraznú variabilitu prechodovej oblasti pokojnej atmosféry Slnka, ktorá vďaka nim aspoň v prechodovej vrstve rozhodne vôbec nie je 'pokojnou' v zmysle nemennosti na akú sme boli pôvodne zvyknutí.

10. ZÁVER

Nielen výrazná a stále nie úplne objasnená variabilita prechodovej vrstvy je tým faktorom, vďaka ktorému nie je možné záverom tohoto príspevku dnes tvrdiť, že o fyzikálnych podmienkach a mechanizmoch panujúcich v prechodovej vrstve už vieme všetko podstatné (pozri napr. príspevok Gömöryho a kol. v tomto zborníku (2002).)

Ťažkosti, s ktorými sa stretávame pri výskume prechodovej vrstvy súvisia i so stále nedostatočným priestorovým, a asi i časovým, rozlíšením našich pozorovaní. Okrem toho vďaka opticky tenkému prostrediu sledujeme emisiu plazmy z celého rozsahu prechodovej vrstvy pozdĺž smeru nášho pozorovania a nemáme žiadne presnejšie informácie o hrúbke tohoto rozsahu. Navyše predpokladáme platnosť termodynamickú rovnováhu v celej prechodovej vrstve, čo nemusí byť zaručené všade a vždy. Stále nám chýbajú i priame merania magnetických polí v prechodovej oblasti a i merania spektier nie sú pre niektoré úlohy dostatočne presné. Avšak uvedomujúc si tieto limitácie dnešných pozorovacích možností pripravujú sa dnes projekty, ktoré by mali pomôcť postúpiť zas dopredu aspoň v smere pozorovaní. Projekty SOLAR-B a Solar Orbiter, ktoré boli pôvodne japonským a európskym projektom, sa iste, za prispenia medzinárodnej komunity, stanú zdrojom ďalších dát, ktoré pomôžu neskôr teoreticky vysvetliť problémy, ktoré nateraz odolávajú a ktorých riešenia nepoznáme.

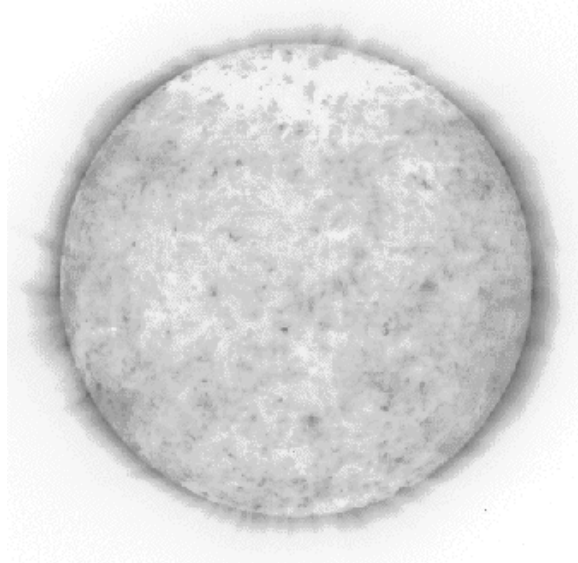
Ukazuje sa, že bez pochopenia prechodovej vrstvy, ktorú i keď amatérskymi prostriedkami nevidíme, ale ktorá predsa len existuje a nedá sa nebrať do úvahy, nebudeme môcť výrazne pokročiť i s vysvetlením problému ohrevu koróny a urýchľovania slnečného vetra. Prechodová vrstva je totiž naozaj kdesi medzi tou spomínanou 'pecou' slnečného povrchu a 'izbou okolo nej' - slnečnou korónou, a i 'guľky' slnečného vetra sú vystreľované z 'pušky' - slnečnej atmosféry, ktorá má uzáver kdesi veľmi blízko prechodovej vrstvy.

POĎAKOVANIE

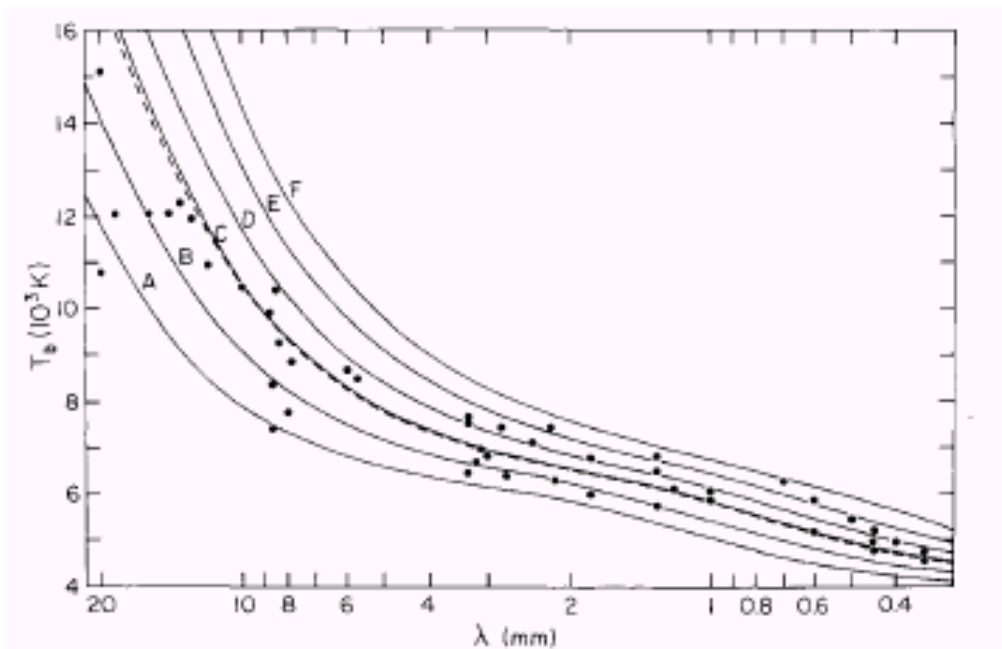
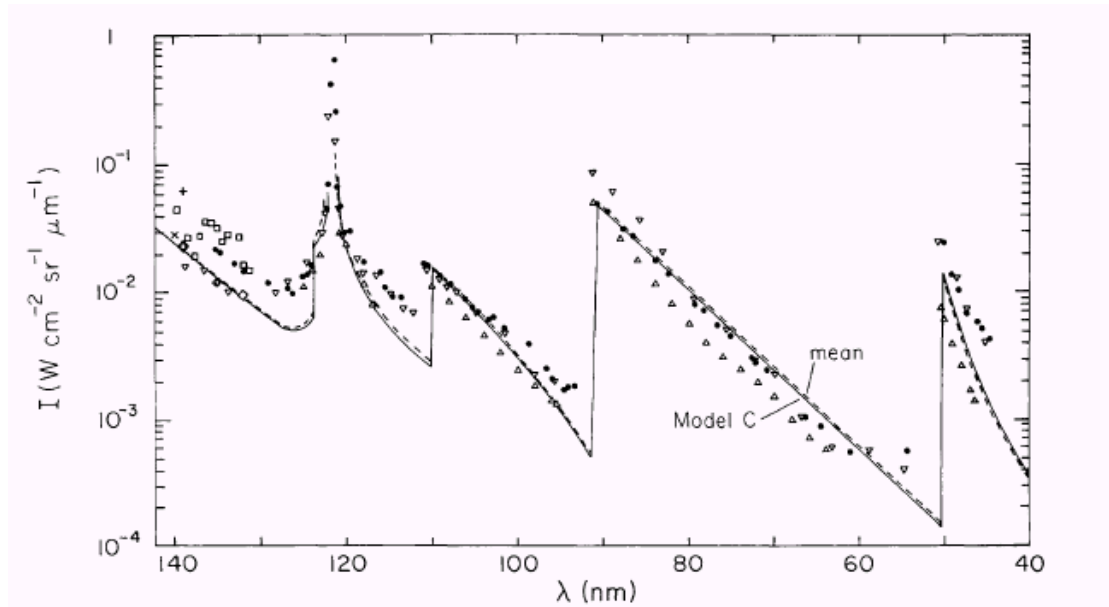
Práca vznikla s podporou Grantovej agentúry VEGA (grant VEGA 2/7229/20).

LITERATÚRA

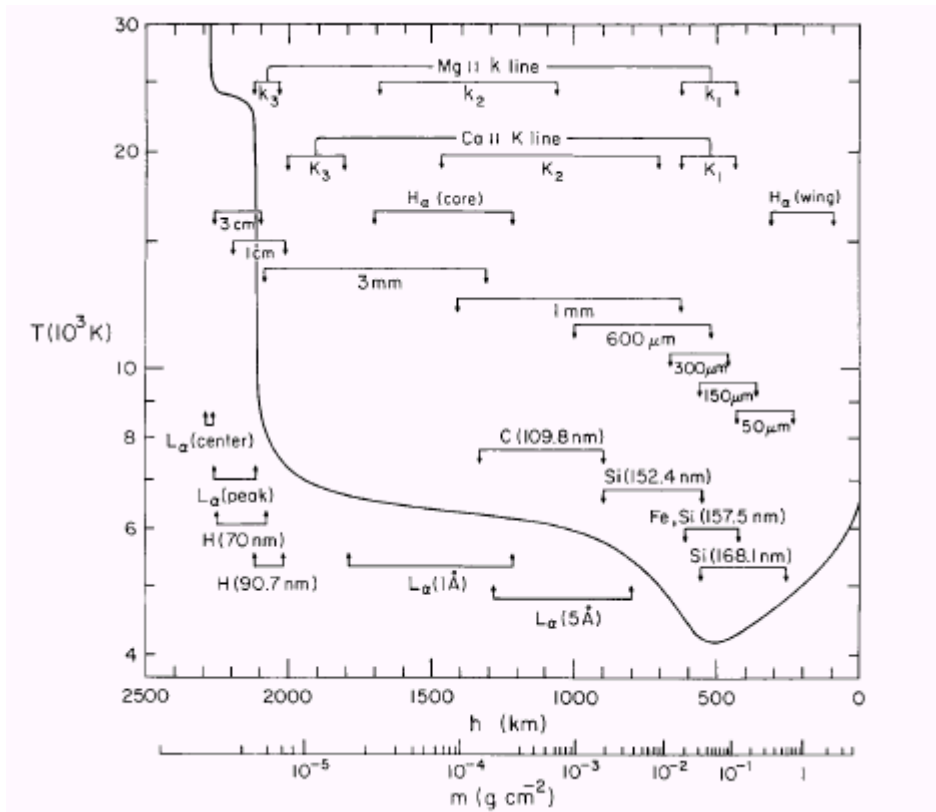
- Curd, W., Brekke, P., Feldman, U. a kol., 2001, *Astronomy and Astrophysics* 375, 591
 Dowdy, J.F., Rabin, D., Moore, R.L., 1986, *Solar Phys.* 105, 35
 Gabriel, A.H., 1976, *Phil. Trans. Roy. Soc. London A.* 281, 339
 Gömöry, P., Rybák, J., Kučera, A., Curdt, W., Höhl, H., 2002, príspevok v tomto zborníku
 Hansteen, V. H., Betta, R., Carlsson, M., 2000, *Astronomy & Astrophysics* 360, 724
 Hansteen, V., Maltby, P., Malagoli, A., 1997, v 'Magnetic Reconnection in the Solar Atmosphere', ed. R. D. Bentley a J. T. Mariska, *ASP Conference Series* 111, 116
 Harrison, R. A., 1997, *Solar Phys.* 175, 467
 Higgins, W., Miller, W.A., 1864, *Phil. Trans. R. Soc.* 154, 437
 Chae, J., Yun, H. S., Poland, A. I., 1998, *Astrophys. J. Suppl.* 114, 151
 Cheng, Q.-Q., 1992a, *Astronomy and Astrophysics* 266, 537
 Cheng, Q.-Q., 1992b, *Astronomy and Astrophysics* 266, 549
 Innes, D. E., Inhester, B., Axford, W. I., Wilhelm, K., 1997, *Nature* 386, 811
 Mariska, J. T., 1988, *Astrophys. J.* 334, 489
 Mariska, J. T., 1992, *The Solar Transition Region*, Cambridge University Press, Cambridge
 Peter, H., 1999, *Astrophys. J.* 552, 1148
 Peter, H., 2001, *Astronomy & Astrophysics* 374, 1110
 Rybanský, M., 2000, v 'Zborník referátov z 15. celoštátneho slnečného seminára, Patince 2000', ed. B.Lukáč, SÚH, Hurbanovo, 127
 Rybák, Kučera, A., Curdt, W., Schühle, U., Wöhl, H., 1998, v 'Zborník referátov z 14. celoštátneho slnečného seminára, Stará Lesná', ed. B.Lukáč, SÚH, Hurbanovo, 68
 Rybák, Kučera, A., Curdt, W., Schühle, U., Wöhl, H., 2000, v 'Zborník referátov z 15. celoštátneho slnečného seminára, Patince 2000', ed. B.Lukáč, SÚH, Hurbanovo, 64
 Tomasz, F., Rybák, J., Kučera, A., Curdt, W., Höhl, H., 2002, príspevok v tomto zborníku
 Vernazza, J.E., Avrett, E.H., Loeser, R., 1981, *Astrophysical J. Suppl.* 45, 635
 Wilhelm, C., Curdt, W., Marsch, E. a kol., 1995, *Solar Phys.* 162, 189



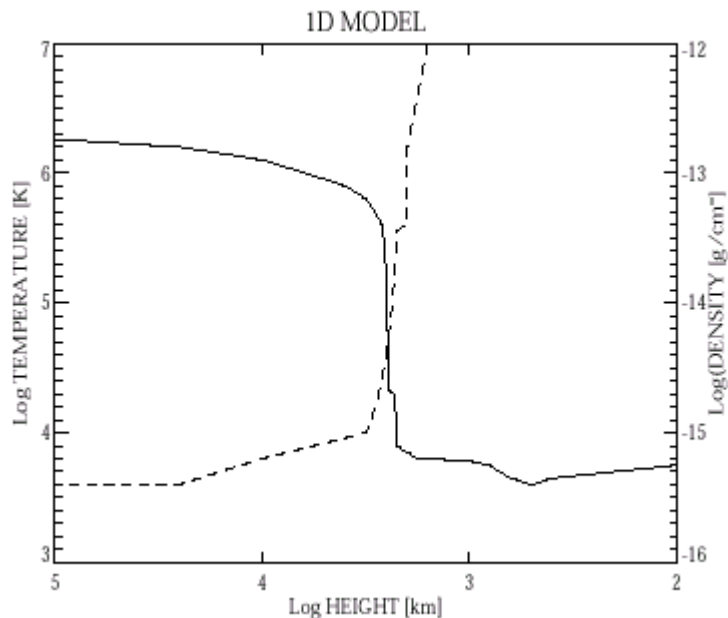
Obrázok 1. Slnko, zaznamenané v čase slnečného minima (16. septembra 1996) pomocou prístroja EIT/SOHO. Spektroheliogram je získaný v pásme vlnových dĺžok okolo 171 Å, kde emitujú žiarenie ióny železa Fe IX a Fe X, ktorých ionizačná energia zodpovedá teplote približne 1.3×10^6 K.



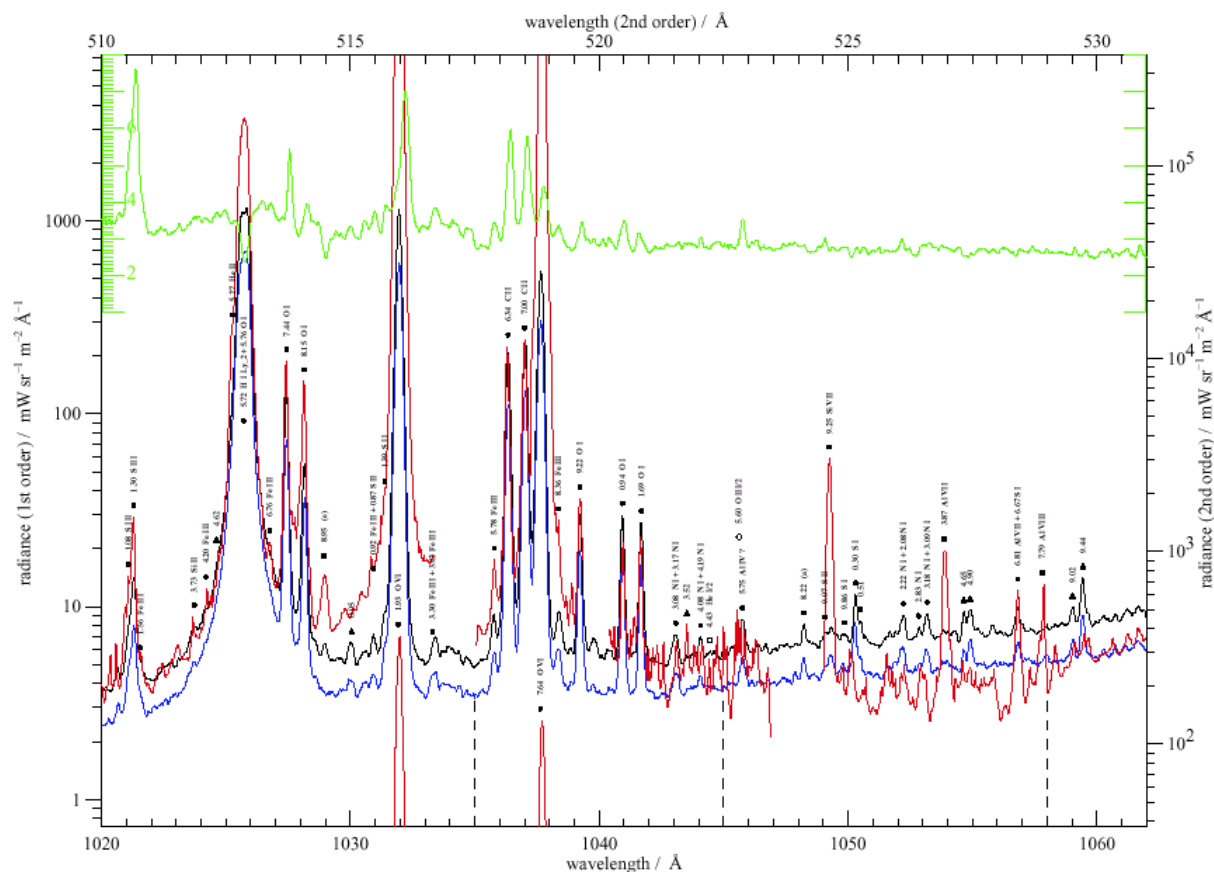
Obrázok 2. Priebehy intenzity kontinua slnečného spektra v ultrafialovej oblasti vlnových dĺžok (horný graf) a v rádiovnej oblasti (dolný graf), publikované v práci Vernazzu a kol. (1981). Bodky označujú výsledky meraní, ktoré boli získané viacerými autormi. Súvislá čiara v hornom grafe ukazuje vypočítaný priebeh intenzity kontinua pre model C z tejto práce, zodpovedajúci priemernej pokojnej slnečnej atmosfére a čiarkovaná čiara zas priemeru viacerých modelov (mean). Tieto modely A-F sú v dolnom grafe znázornené súvislými čiarami. (X-os: λ - vlnová dĺžka, y-os: I - intenzita, T - teplota).



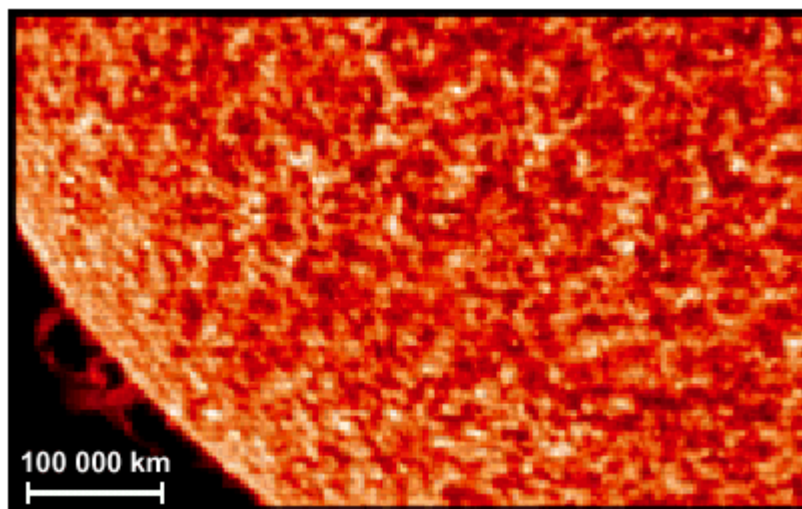
Obrázok 3. Model priebehu teploty s výškou nad povrchom Slnka. Graf, prevzatý z práce Vernazzu a kol. (1981) znázorňuje priebeh teploty od povrchu Slnka ($h=0\text{km}$) cez teplotné minimum ($h=500\text{km}$) a nárast teploty v chromosfére ($h=500\text{-}2000\text{km}$) do horných vrstiev chromosféry, kde začína prudký nárast teploty z približne 8000K na viac ako 20000K . V grafe sú schématicky znázornené vrstvy atmosféry v ktorých vzniká žiarenie výrazných spektrálnych čiar a úsekov kontinua. (X-os: h - geometrická výška, y-os: T - teplota).



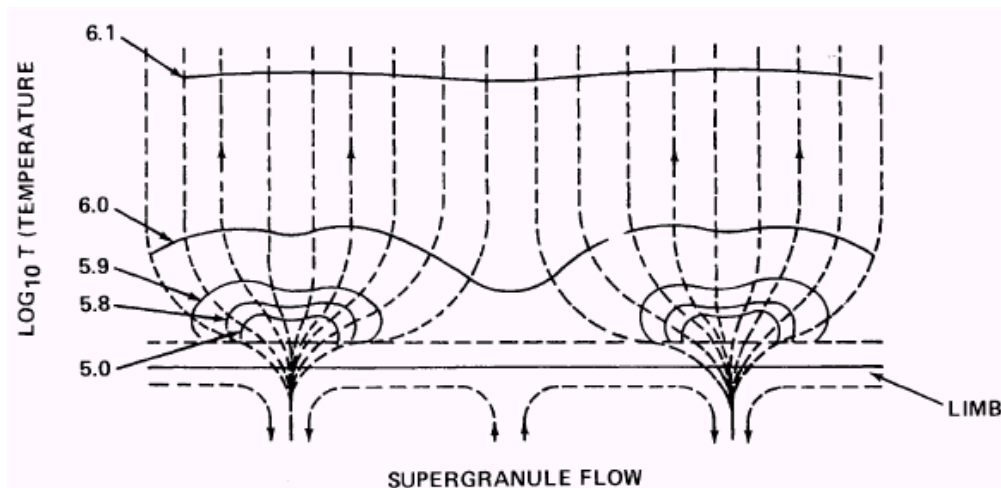
Obrázok 4. Model priebehu teploty a hustoty plazmy s výškou nad povrchom Slnka. Graf, prevzatý z monografie Marisku (1992) znázorňuje priebeh teploty (súvislá čiara) od fotosféry cez teplotné minimum a chromosféru do koróny. Prudký nárast teploty pokračuje až po teplotu približne 600000K , kde sa už gradient teploty s narastajúcou výškou znižuje. Naopak priebeh hustoty plazmy (prerušovaná čiara) vykazuje inverzný priebeh s najvyšším poklesom v miestach najvyššieho nárastu teploty. (X-os: log height - logaritmus geometrickej výšky, y-os: log temperature/density - logaritmus teploty/hustoty).



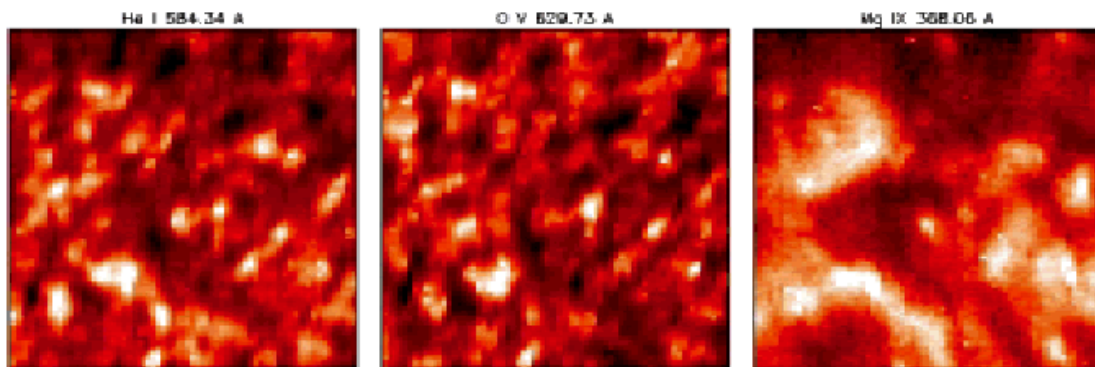
Obrázok 6. Ukážka emisného spektra Slnka v UV oblasti v okolí vlnovej dĺžky 1040 Å (Curdt a kol., 2001). Rôzne druhy čiar zobrazujú spektrá, získané v rôznych polohách, napr. pokojnom Slnku pred diskom, koronálnej diere nad limbom. široká čiara vľavo je čiara H I Lyman 6#6, štyri výrazné čiar vpravo od nej prislúchajú iónom O VI a C II (pozri príspevok Tomasz a kol. v tomto zborníku). (X-os: wavelength / Å - vlnová dĺžka / Å, y-os: intenzita [mW/ster/m²/ Å]).



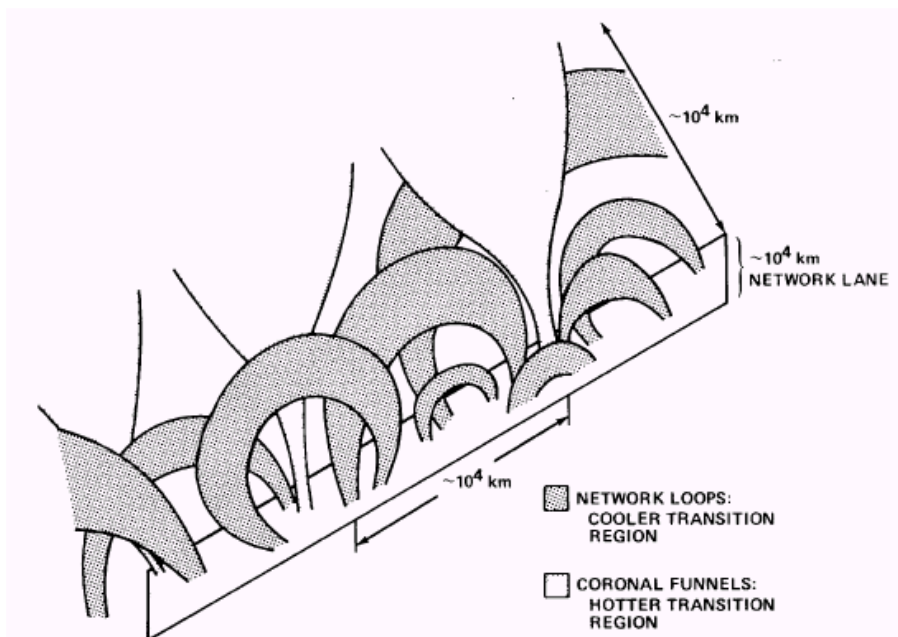
Obrázok 7. Ukážka spektroheliogramu prechodovej vrstvy pokojného Slnka, získaného v emisnej čiare C III (977 Å) 28. januara 1996. Obrázok zachytáva supergranulačné štruktúry na okraji slnečného disku a protuberanciu na jeho okrajom (Domovská stránka prístroja SUMER: www.linmpi.mpg.de/english/projekte/sumer/).



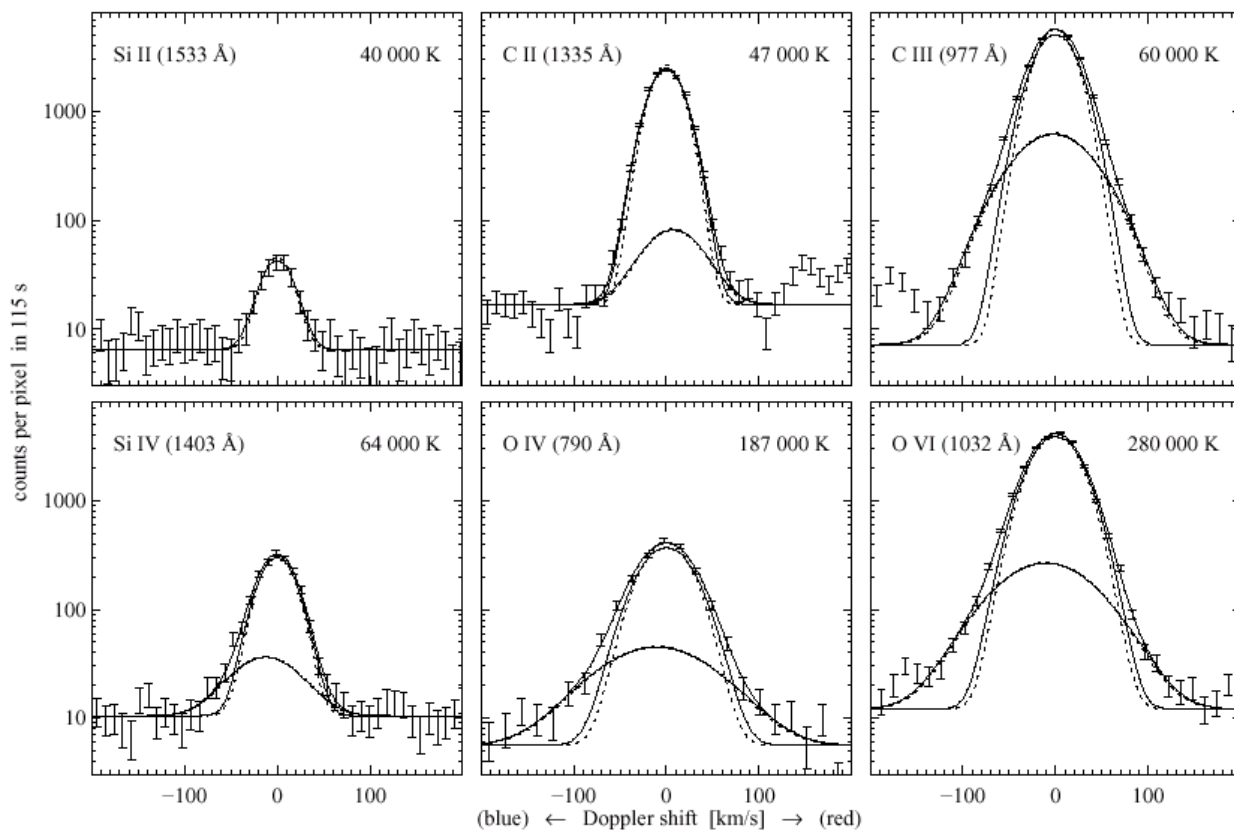
Obrázok 8. Schématický model štruktúry prechodovej vrstvy Slnka podľa Gabriela (1976). Obrázok znázorňuje supergranulačný konvektívny pohyb plazmy, konfiguráciu magnetických silotrubíc, rozširajúcich sa do formy 'lievikov' a priebeh logaritmu teploty v jednotlivých výškach nad povrchom Slnka.



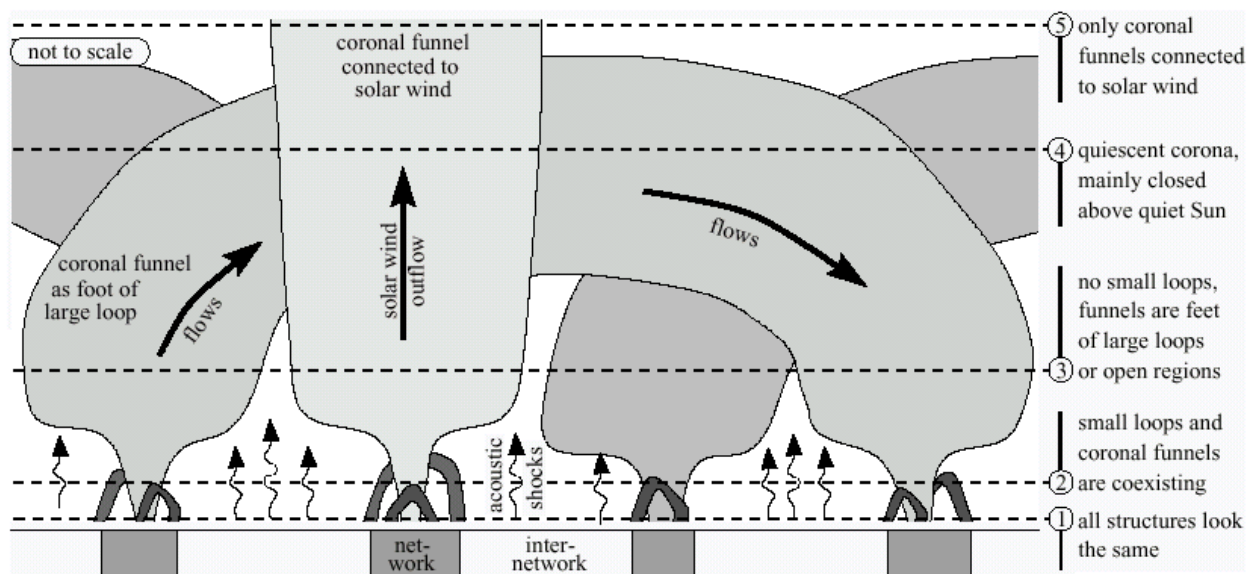
Obrázok 9. Ukážka súvislosti štruktúr chromosféry, prechodovej vrstvy a koróny pokojného Slnka. Spektorheliogramy sú získané v emisných čiarach chromosféry HeI 584 Å (2×10^4 K, vľavo), prechodovej vrstvy O V 529 Å ($2,5 \times 10^5$ K, v strede) a koróny MgIX 368 Å (1×10^6 K, vpravo). Pozorovanie bolo urobené v strede slnečného disku 27. augusta 1996 (07:12 UT). Zdroj: domovská stránka CDS/SOHO <http://solg2.bnsc.rl.ac.uk/gallery/1-qsun.shtml>.



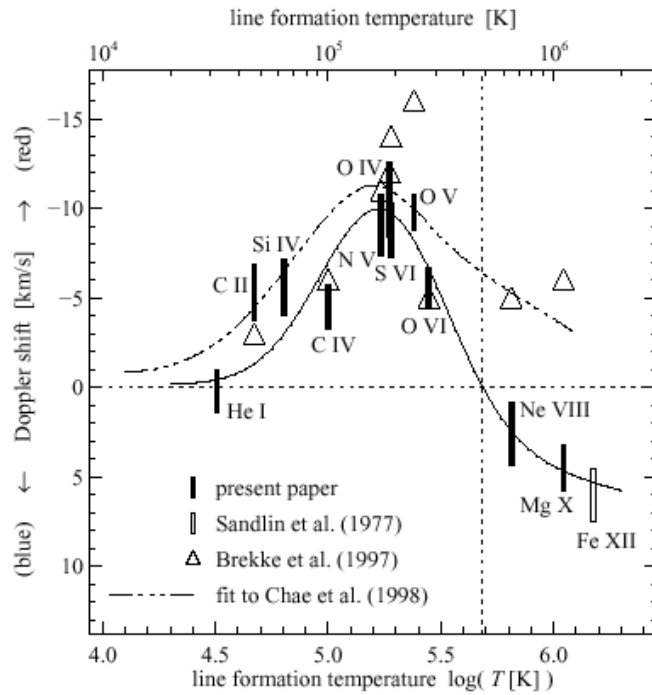
Obrázok 10. Schématický model štruktúry prechodovej vrstvy Slnka podľa Dowdyho a kol. (1986). Obrázok znázorňuje navrhnutú kombináciu teplejších unipolárnych magnetických silotrubíc, rozširajúcich sa v koróne do formy 'lievikov' a chladnejších bipolárnych menších 'slučiek' nad povrchom pokojného Slnka.



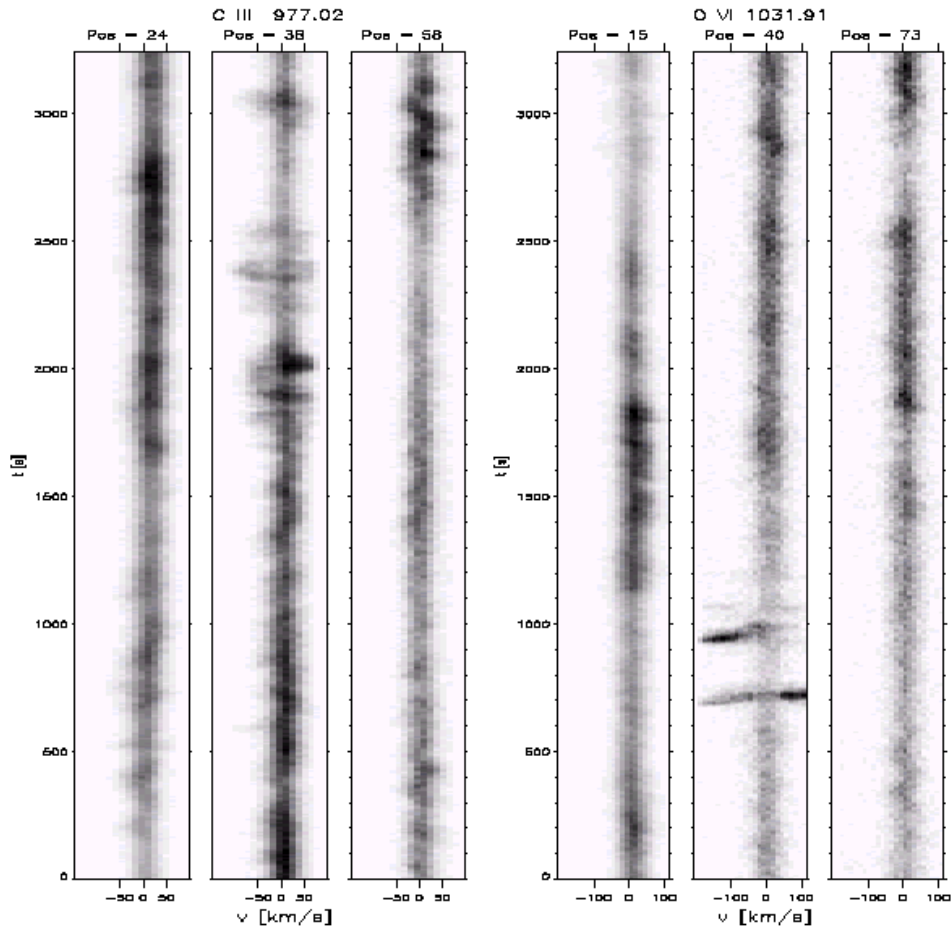
Obrázok 11. Príklady profilov spektrálnych čiar, pozorovaných na hraniciach supergranúl v prechodovej vrstve v rozsahu teplôt $4,0 \times 10^4$ K - $2,8 \times 10^5$ K (zvislé úsečky). Tenké súvislé čiary ukazujú profily jednotlivých dekomponovaných gaussovských profilov. Až pomocou súčtu týchto gaussovských profilov (hrubá súvislá čiara) sa podarilo dostatočne dobre aproximovať pozorované profily čiar (Peter, 2001). Tenké prerušované čiary znázorňujú gaussovské komponenty opravené o inštrumentálne rozšírenie profilov. (X-os : dopplerov posun (km/s), y-os : počet impulzov za 115 sekúnd).



Obrázok 12. Schématický model štruktúry prechodovej vrstvy Slnka podľa Petera (2001). Obrázok znázorňuje navrhnutú kombináciu teplejších unipolárnych magnetických silotrubíc, rozvíjajúcich sa v koróne do formy 'lievikov' a chladnejších bipolárnych menších 'slučiek' nad povrchom pokojného Slnka. V spodných vrstvách sú obe štruktúry podobné, vyššie obe štruktúry koexistujú, ale lieviky už vyplňajú väčšinu objemu, pričom ďalšie vrstvy sú už tvorené hlavne pokojnými ale uzavretými slučkami. Nad nimi (do koróny) postupujú len otvorené konfigurácie lievikov unipolárnych polí.



Obrázok 13. Graf výsledkov meraní priemerného dopplerovského posunu spektrálnych čiar v prechodovej vrstve v závislosti na teplote ich tvorenia (Peter, 1999). Merania viacerých autorov sú uvedené jednotlivými symbolmi. Bodkočiarkovaná čiarou je uvedená aproximácia starších dát (Chae a kol., 1998) a súvislou čiarou je zas uvedená aproximácia novších dát získaných Peterom. Prerušované tenké čiary udávajú nulový dopplerovský posun a jemu zodpovedajúcu teplotu pre aproximáciu Petera (5.68×10^5 K). (X-os : teplota tvorenia čiar (logaritmus T [K]), y-os : dopplerovský posun [km/s]).



Obrázok 14. Príklad časovej premenlivosti profilov spektrálnych čiar, pozorovaných na hraniciach a vo vnútri supergranúl v prechodovej vrstve pri teplotách 8×10^4 K (čiara CIII 977 Å, panely vľavo) a $3,2 \times 10^5$ K (čiara OVI 1032 Å, panely vpravo) (Hansteen a kol., 2000). (X-os : dopplerov posun (km/s), y-os : čas [s]).