

# Žiarenie slnečnej chromosféry

*J. Kozá, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, kozá@astro.sk*

## Abstrakt

Príspevok podáva stručnú charakteristiku čiarového spektra slnečnej chromosféry vo vizuálnej oblasti a jej spojitého spektra (kontinua) vo vizuálnej, milimetrovej a submilimetrovej (mm-submm) oblasti. Príspevok predstavuje procesy tvoriace vizuálne kontinuum pozorovateľné na limbe a kontinua v mm-submm oblasti. Čiary sodíkového dubletu Na I  $D_1$  a  $D_2$  nie sú v pravom slova zmysle chromosférické, pretože ich jadrá sú tvorené hlavne rezonančným rozptylom žiarenie hornej fotosféry, a preto poskytujú informáciu iba o rýchlostných poliach v chromosfére. Výskyt dubletu Na I  $D_1$  a  $D_2$  spolu s čiarami hélia s veľkou excitačnou a ionizačnou energiou naznačuje zložitú termodynamickú štruktúru chromosféry. Ako ukazujú numerické simulácie, chromosféra sa v oblastiach mimo magnetickej siete skladá z chladnejších oblastí obalených horúcou látkou, čo umožňuje vznik spektrálnych čiar vo veľkom rozsahu excitačných a ionizačných energií. Príspevok poukazuje na veľký diagnostický potenciál kontinuí v mm-submm oblasti spektra chromosféry, ktorý bude naplno využitý po dokončení rádioteleskopu ALMA pri štúdiu jemnej štruktúry chromosféry s veľmi veľkým uhlovým a časovým rozlíšením.

Pomenovanie chromosféry<sup>1</sup> výstižne označuje nielen jej vzhľad, teda známy červenkastý oblúk viditeľný tesne pred a po úplnom zatmení Slnka (Obr. 1), ale v istej miere aj fyzikálny pôvod jej žiarenia. Vo vizuálnej časti spektra je totiž prevažná časť žiarenia chromosféry emitovaná v niekoľkých najsilnejších spektrálnych čiarami (Obr. 2), inými slovami diskretných „farbách“. Dominantnými sú čiary Ca II K a H, Balmerova séria vodíka, Na I  $D_1$  a  $D_2$  a He I  $D_3$ . Zmiešaním ich farieb vzniká charakteristické zafarbenie chromosféry. Detailnejší pohľad ukazuje zložitejšiu skutočnosť. Totiž spektrum chromosféry pozorované na limbe (Obr. 2) má aj kontinuum tvorené nasledujúcimi procesmi (Bray a Loughhead 1974, str. 154):

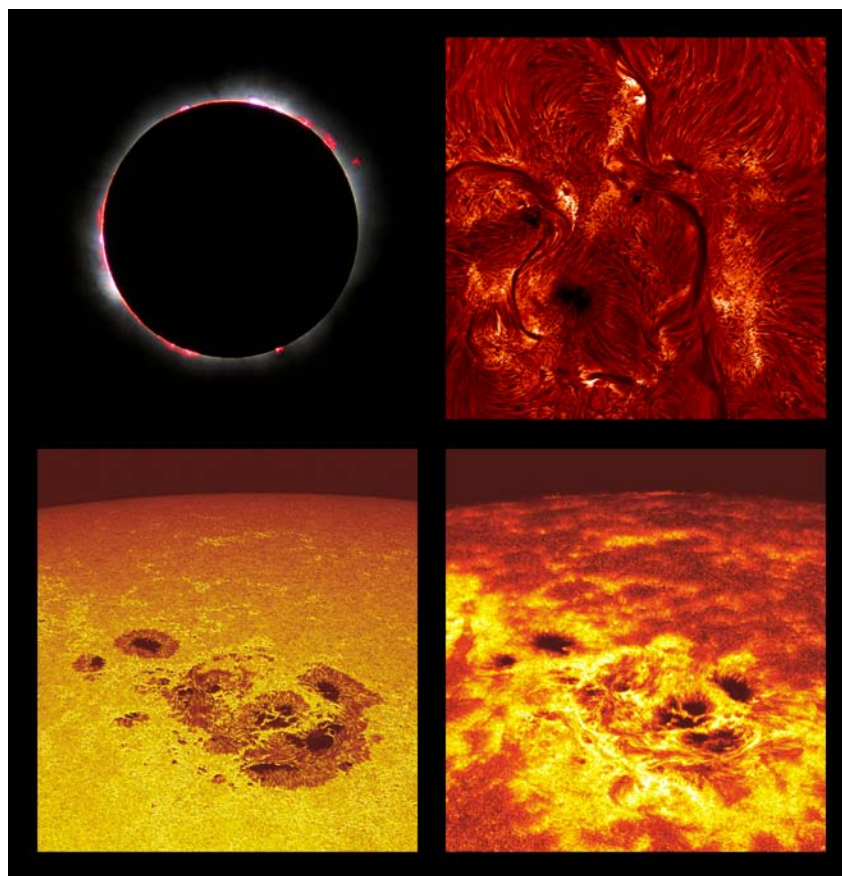
1. viazano-voľné prechody neutrálneho vodíka (hrany Balmerovej a Paschenovej série);
2. Thomsonov rozptyl na voľných elektrónoch;
3. Rayleighov rozptyl neutrálnym vodíkom;
4. viazano-voľné prechody negatívneho iontu vodíka.

V minulosti bola štruktúra chromosféry často určovaná práve z bezštrbinových bleskových spektier jej kontinua

<sup>1</sup> Meno pochádza z gréckeho χρωμα (farba) a σφαίρα (guľa) a zaviedli ho v r. 1869 slnečný fyzik J. N. Lockyer a chemik E. Frankland (Bray a Loughhead, 1974).

(napr. Hiei a Hirayama 1970, Tanaka a Hiei 1972). Rozhodujúci podiel na formovaní kontinua na limbe vo vizuálnej oblasti majú procesy 2. a 4. (Bray a Loughhead 1974, obr. 4.6, str. 156), ktoré si vyžadujú vysokú koncentráciu voľných elektrónov. Dodávame, že v procesoch 2. a 3. dochádza k rozptylu fotosférického žiarenia. K zaujímavému výsledku vedie bilancia celkových radiačných strát chromosféry (Vernazza a kol. 1981; Stix 2004, tab. 9.5., str. 425). Tá ukazuje, že rozhodujúci podiel na jej radiačných stratách vo vizuálnej oblasti má žiarenie čiar Ca II K a H. Vyžarovanie vodíka (Balmerova séria a jej hrana) je približne v radiačnej rovnováhe, a teda vodík sa podieľa na celkových radiačných stratách chromosféry len nevýznamne, čo je prekvapujúci záver vzhľadom na intenzitu čiar Balmerovej série v bleskovom spektre (Obr. 2). Príspevok ostatných čiar a kontinuí k celkovým radiačným stratám vo vizuálnej oblasti je zanedbateľný.

V bleskovom spektre chromosféry je prítomný aj známy žltý sodíkový dublet Na I  $D_1$  a  $D_2$  (Obr. 2). O to viac prekvapuje konštatovanie, že čiary dubletu nie sú v pravom slova zmysle chromosférické z hľadiska mechanizmu formovania žiarenia ich jadier. Non-LTE výpočty totiž ukazujú (Uitenbroek a Bruls 1992; Rutten 2007, 2010b; Leenaarts 2010), že rezonančný rozptyl popísaný ďalej dominuje pri formovaní žiarenia jadier dubletu. Preto pozorovanie intenzity žiarenia v jadrách

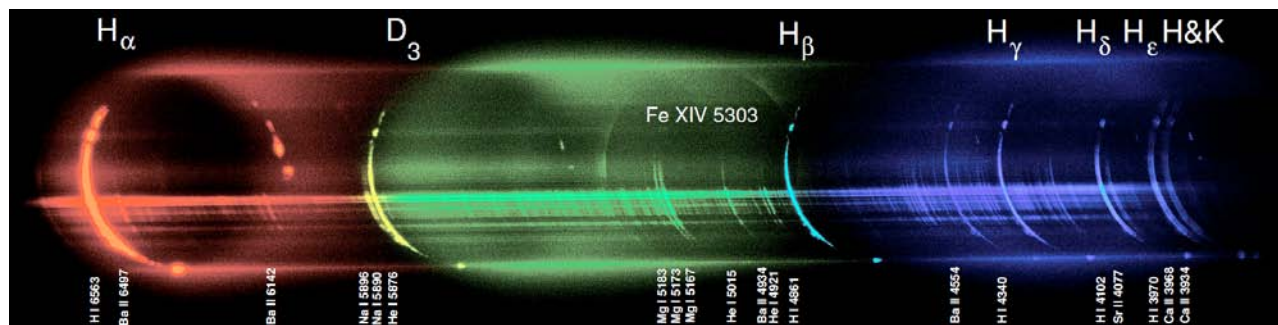


**Obr. 1** V smere hodinových ručičiek: Chromosféra počas úplného zatmenia Slnka 11. augusta 1999, chromosféra v čiare  $H\alpha$  a jej jemná štruktúra reprezentovaná tmavými fibrilami v okolí škvŕny blízko stredu disku, chromosféra a čiastočne horná fotosféra v čiare  $Ca II H$  v okolí rozsiahlej aktívnej oblasti blízko limbu, tá istá aktívna oblasť pozorovaná v molekulárnom G páse mapujúcom dolnú fotosféru (Rutten 2010a). Holandský otvorený teleskop DOT, <http://dot.astro.uu.nl/>.

prináša informáciu o termodynamike hornej fotosféry a nie chromosféry, ako by bolo možné usudzovať len na základe výskytu dubletu v bleskovom spektre (Obr. 2). Napriek tomu čiary dubletu môžu byť použité pre výskum rýchlostných polí v chromosfére, pretože Dopplerovský posun je zakódovaný fotónu v poslednom rozptylovom procese na jeho ceste k pozorovateľovi (Rutten 2007).

V blízkosti sodíkového dubletu sa v bleskovom spektre nachádza veľmi jasná čiara  $He I 5876 \text{ \AA } D_3$ . Je opticky tenká a v spektre slnečného disku nemá na rozdiel od ostatných výrazných čiar bleskového spektra absorpčný náprotivok. Preto ju Joseph von Fraunhofer pri objave absorpčných čiar v spektre Slnka v roku 1814 nemohol pozorovať a nie je teda Fraunhoferovou čiarou, ako by bolo možné usudzovať z jej historického označenia  $D_3$  zavedeného neskôr N. Lockyerom. Až počas úplných zatmenia Slnka 18. augusta a 20. októbra 1868 Pierre Jules Janssen a Norman Lockyer nezávisle od seba po prvý krát zaznamenali prítomnosť jasnej emisnej čiar v štrbinovom spektre chromosféry v tesnej blízkosti sodíkového dubletu. Preto jej označenie  $D_3$ . Bleskové spektrum naznačuje, v ktorých spektrálnych čiarach je

možné pozorovať chromosféru na disku (Obr. 1). Zjednodušene povedané žiarenie v jadrách týchto čiar mapuje podmienky v chromosfére, pretože v projekcii na disk je práve chromosféra miestom, v ktorom je optická hĺbka v ich jadrách rovná jednej. Exaktnejším vyjadrením tohto empirického faktu je Obr. 3 prevzatý z pravdepodobne najcitovanejšej práce slnečnej fyziky Vernazza a kol. (1981). Obr. 3 reprezentuje štruktúru statickej (teda len modelovej, hypotetickej) a pokojnej slnečnej atmosféry priebehom teploty s výškou. Horizontálne čiary so šípkami označujú rozsahy výšok, v ktorých sa tvoria podľa tohto modelu vyznačené časti spektrálnych čiar a kontinuí. Presnejšie v týchto výškach je tvorených 90% plochy príslušnej príspevkovej funkcie  $dI/dh$  (z angl. contribution function, Rutten (2007)). To znamená, že z tých výšok pochádza väčšina žiarenia emitovaná v uvedených častiach profilu čiary alebo kontinua. V grafe sú uvedené čiary najčastejšie využívané pri pozorovaniach chromosféry na disku Slnka vo vizuálnej a UV oblasti a to:  $Mg II k$ ,  $Ca II K$  a  $H\alpha$ . Graf naznačuje, kde by sa podľa tohto statického modelu pokojnej slnečnej atmosféry mali formovať ich jadrá



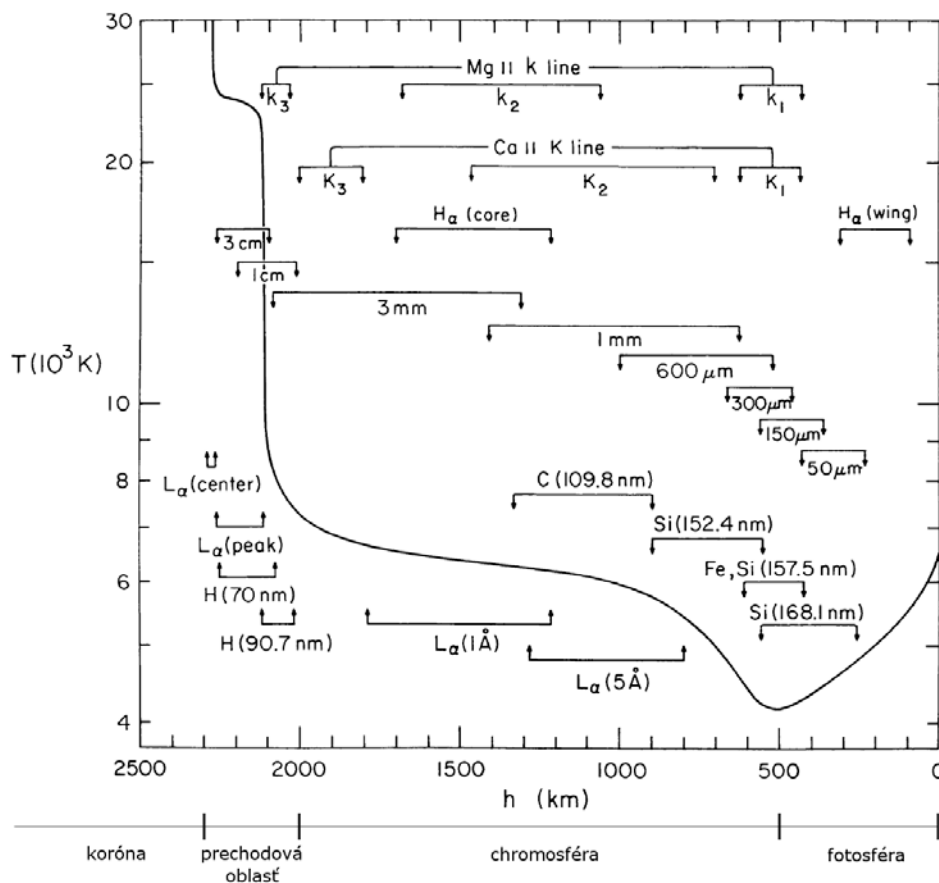
Obr. 2. Bezštrbinové bleskové spektrum exponované 11. augusta 1999 na film Ektachrome 200 (Rutten 2010a). Autor: Manfred Rudolf, EurAstro Team Szeged I, <http://www.eurastro.de/webpages/MRSPECT.HTM>. Spektrum bolo získané pomocou mriežky s 200 vrypmi/mm umiestnenej pred 500-mm objektívom na klasickej 35-mm zrkadlovke. Chromatická chyba objektívu sa prejavuje neostroťou čiar na oboch koncoch spektra. Zelená koronálna čiara Fe XIV 5303 vytvorila neostré zele nkasté lemovanie okolo tmavého disku Mesiaca. Zmes farieb najsilnejších čiar bleskového spektra dáva chromosfére charakteristickú farbu viditeľnú na prvom paneli Obr. 1.

a krídla ako aj lokálne extrémny v ich jadrách označované ako  $k_{1,2,3}$  a  $K_{1,2,3}$ . Z tohto informačne bohatého grafu je vidieť, že v chromosfére sú formované okrem jadier spomenutých čiar aj kontinua v mm-submm oblasti spektra Slnka v rozsahu vlnových dĺžok približne od 3 mm do 600  $\mu\text{m}$ . Ich žiarenie presne splňa podmienky lokálnej termodynamickej rovnováhy (Local Thermodynamic Equilibrium LTE), pretože sa jedná o takzvané brzdné žiarenie (z nem. bremsstrahlung) vznikajúce voľno-voľnými prechodmi pri elastických zrážkach elektrónov a protónov. Podstata tohto procesu zaručuje tesnú väzbu medzi poľom žiarenia a termodynamikou látky, teda teplota žiarenia presne kopíruje lokálnu teplotu látky. Tým je splnená jedna z podmienok platnosti LTE, čo v porovnaní s chromosférickými spektrálnymi čiarami významne uľahčuje interpretáciu pozorovaní mm-submm kontinuí chromosféry. Naopak žiarenie chromosférických čiar má silne nelokálny charakter a na jeho interpretáciu je potrebný aparát známy ako NLTE alebo Non-LTE. Nelokálnosť objasníme na príklade rezonančného rozptylu fotónov vybraného z veľkého komplexu možných NLTE procesov. Pri rezonančnom rozptyle primárny fotón so správnou energiou, ktorý mohol priletieť z geometricky vzdialenej časti atmosféry, excituje atóm alebo ión do vzbudeného stavu. Pri novej následnej spontánnej alebo iným fotónom vynútenej (indukovanej) deexcitácii<sup>2</sup> vzniká sekundárny fotón s energiou veľmi podobnou primárnemu fotónu. Tá sa však môže diametrálne odlišovať od termodynamického stavu okolitej látky. Teda v prípade spektrálnej čiary pri vzniku ktorej dominuje rezonančný rozptyl nefunguje väzba medzi poľom žiarenia a termodynamikou látky. Môže tak nastať situácia, keď sa pozorovateľovi v dôsledku dominantného

<sup>2</sup> Atóm alebo ión v hustom prostredí môže prejsť do základného stavu aj zrážkovou deexcitáciou.

rezonančného rozptylu javí relatívne chladná látka ako horúca alebo naopak.

Spektrálna blízkosť čiar  $D_1$ ,  $D_2$  a  $D_3$  spolu s prítomnosťou čiary jedenkrát ionizovaného hélia He II 4686 Å v bleskovom spektre názorne dokumentuje komplikovanosť štruktúry a radiačných procesov v chromosfére (Athay 1976). Neutrálny stupeň je minoritným ionizačným stupňom sodíka v chromosfére. V dôsledku jeho nízkej ionizačnej energie 5,1 eV je pri typickej chromosférickej teplote väčšina atómov sodíka v prvom ionizačnom stupni. Relatívne vysoká intenzita jeho dubletu je spôsobená vysokou pravdepodobnosťou, s ktorou zodpovedajúce prechody nastávajú. Čiary dubletu sú rezonančné čiary a dolná hladina ich prechodu je zároveň základnou hladinou s nulovou energiou. Na druhej strane pre dostatočné obsadenie dolnej hladiny čiary  $D_3$  je potrebná podstatne vyššia teplota, nakoľko jej energia je až 21 eV. Ešte vyššia teplota je potrebná pre ionizáciu hélia, ktorého ionizačná energia je 24,6 eV a energia dolnej hladiny prechodu generujúceho čiary He II 4686 Å je až 48,4 eV. Athay (1976) ako možné vysvetlenie navrhuje excitáciu a ionizáciu hélia röntgenovým a UV žiarením z koróny a prechodovej oblasti a/alebo excitáciu a ionizáciu hélia v horúcich oblastiach termodynamicky veľmi nehomogénnej chromosféry. Pozorovania a numerické simulácie ukazujú, že chromosféra je skutočne veľmi nehomogénna. Jej termodynamická štruktúra v pokojných oblastiach mimo siete sa skladá z hustého pletiva vysokoteplotných plôch vytvoreného interferenciou nárazových vln budených fotosférickou dynamikou. Plochy akoby obaľovali oblasti vyplnené podstatne chladnejšou látkou (Wedemeyer-Böhm a kol. 2004, Leenaarts a kol. 2007). V oblastiach chromosférickej siete pôsobí doteraz stále neobjasnený mechanizmus chromosférického ohrevu. V takomto nehomogennom prostredí môžu súčasne vznikať spektrálne čiary vo veľmi veľkom rozsahu excitačných a ionizačných energií.



Obr. 3. Priebeh teploty s výškou v modeli pokojnej slnečnej atmosféry VAL3C (Vernazza a kol. 1981). Horizontálne čiary so šípkami označujú rozsahy výšok, v ktorých sa podľa modelu tvoria vyznačené spektrálne čiary a kontinua.

Hoci model VAL3C dobre reprodukuje spektrálne rozloženie energie v širokom rozsahu vlnových dĺžok, je to model predpokladajúci rovinné rozvrstvenú, tzv. planparalelnú, a teda idealizovanú atmosféru v hydrostatickej rovnováhe. V predchádzajúcom odseku sme už naznačili, že slnečná chromosféra je veľmi nehomogénna a jej štruktúry sa veľmi rýchlo dynamicky menia. Model VAL3C je preto modelom “neexistujúcej statickej hviezdy VAL3C” (Rutten 2007) a je výbornou didaktickou pomôckou pomáhajúcou pochopiť zložité radiačné procesy v reálnej slnečnej atmosfére. VAL3C naznačuje zatiaľ málo využívané pozorovacie okná do chromosféry, ktorými sú už spomínané mm-submm kontinua vznikajúce pri voľno-voľných prechodoch (Obr. 3). Práve túto doteraz málo využívanú oblasť slnečného spektra sprístupní rádioteleskop ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), ktorého dokončenie je plánované na rok 2012.

#### Pod'akovanie

Článok vznikol s podporou Grantovej agentúry VEGA (grant 2/0064/09).

#### LITERATÚRA

- Athay R. G.: 1976, The solar chromosphere corona: Quiet sun, Astrophysics Space Science Library, 53.
- Bray R. J., Loughhead R. E.: 1974, The solar chromosphere, Chapman Hall, London.
- Hiei E., Hirayama T.: 1970, Publications of the Astronomical Society of Japan, 22, 545.
- Leenaarts J., Carlsson M., Hansteen V., Rutten R. J.: 2007, Astronomy & Astrophysics, 473, 625.
- Leenaarts J., Rutten R. J., Reardon K., Carlsson M., Hansteen V.: 2010, The Astrophysical Journal, 709, 1362.
- Rutten R. J.: 2007, In: The Physics of Chromospheric Plasmas, ASP Conf. Series, Vol. 368, Editors: P. Heinzel, I. Dorotovič, R. J. Rutten, 27.
- Rutten R. J.: 2010a, <http://arxiv.org/abs/1002.1482>
- Rutten R. J.: 2010b, In: Recent Advances in Spectroscopy Theoretical, Astrophysical Experimental Perspectives, Editors: R. K. Chaudhuri, M. V. Mekkaden, A. V. Raveendran, A. Satya Narayanan, 163.
- Stix M.: 2004, The sun: an introduction, 2nd ed., Astronomy astrophysics library, Berlin: Springer, ISBN: 3540207414.
- Tanaka, K. Hiei, E.: 1972, Publications of the Astronomical Society of Japan, 24, 323.
- Uitenbroek H., Bruls J. H. M. J.: 1992, Astronomy & Astrophysics, 265, 268.
- Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.: 1981, The Astrophysical Journal Supplement Series, 45, 635.
- Wedemeyer S., Freytag B., Steffen M., Ludwig H.-G., Holweger H.: 2004, Astronomy & Astrophysics, 414, 1121.