

## Mnohotvárnost' jemných štruktúr bielej koróny

V. Rušin<sup>1</sup>, M. Druckmüller<sup>2</sup>, M. Minarovjech<sup>1</sup> a M. Saniga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Astronomický ústav SAV, 059 60 Tatranská Lomnica, Slovenská republika

<sup>2</sup>Ústav matematiky, Fakulta strojního inžinírství, Vysoké učení technické Brno, 616 69 Brno, Česká republika

**Abstrakt.** Biela koróna do 2 polomerov Slnka sa dá najlepšie pozorovať len počas úplných zatmení Slnka. Dômyselné metódy matematiky, digitálna technika a výpočtová technika spracovania obrázkov bielej koróny umožňujú pozorovať veľmi jemné štruktúry (niekoľko oblúkových sekúnd) v tejto oblasti bielej koróny aj s ďalekohľadmi (objektívmi) s ohniskovou vzdialenosťou 1-2 m. V predloženej práci budeme diskutovať takéto štruktúry ako sa získali počas zatmení v rokoch 2001, 2005 a 2006. Okrem klasických veľkoškálových štruktúr, napr. prilbicovitých lúčov, polárnych a ihlicovitých lúčov, našli sa v týchto lúčoch máloškálové štruktúry, napr. slučky, tenké radiálne aj zakrivené lúče, veľmi tmavé bubliny a trhliny a pod. Takto získaná biela koróna s veľkým priestorovým rozlíšením sa značne líši od „klasickkej“ koróny, v ktorej teplota a hustota častíc s výškou sa vyjadruje podľa zákona hydrostatickej rovnováhy. Pre nami prezentovanú korónu sú rozhodujúcim parametrom len magnetické polia Slnka. Koróna z posledného zatmenia Slnka 29. marca 2006 tiež indikuje, že z vrcholcov „chladných“ protuberancií „trčia“ tenké, asi horúce slučky, ktoré pokračujú v koróne. Okrem toho, na základe pozorovaní z posledných rokov sa ukazuje, že „chýbajúca“ biela koróna na záberoch z koronografu C2 na kozmickej sonde SOHO by sa mohla „nahradiť“ korónou, ktorá sa na SOHO získava v EUV oblasti spektra. Detailne otestovať tento fakt bude možné počas koordinovaných pozemských pozorovaní úplných zatmení Slnka 1. augusta 2008 a 22. júla 2009 a prístrojmi na umelých družiciach Zeme HINODE, TRACE a kozmickej sonde SOHO.

### 1. Úvod

Dlhoročné pozorovania bielej koróny (zložky  $K$  a  $F$ ) počas úplných zatmení Slnka ukázali na veľkú variabilitu jej štruktúr – od veľkoškálových, akými sú prilbicovité lúče, po „supertenké“ útvary s rozlíšením menej ako 1 oblúková sekunda (November, Koutchmy a Lebecq, 1996), ktoré vytvárajú lokálne a globálne magnetické polia na Slnku. Prilbicovité lúče v klasickom ponímaní sú štruktúry v koróne, ktorých základňa pri povrchu Slnka dosahuje až desaťtisíce kilometrov. Sú to zrejme dlhožijúce útvary a môžu sa rozširovať až do medziplanetárneho snečného vetra. Odlišná je situácia pre máloškálové útvary, napríklad nite (papršky, trysky), polárne lúče, neutrálne „hrany“, koronálne „prázdnoty“, atď., ktorých životnosť nie je známa, a podobne ako vo väčšine prípadov, ani ich vzťah a lokalizácia voči útvarom vo fotosfére (chromosfére). Napríklad, prilbicovité lúče zo zatmenia Slnka 29. marca 2006 boli pozorovateľné až do 13 polomerov Slnka a koronografom C3 na kozmickej sonde SOHO až do vzdialenosti do 30 polomerov Slnka. Kým máloškálové štruktúry sú ako tak známe, veľmi málo vieme o supertenkých štruktúrach - menej ako jedna oblúková sekunda, pretože boli pozorované len raz (November, Koutchmy a Lebecq, 1996).

Kým pozorovania prilbicovitých lúčov sa dajú počas úplných zatmení Slnka robiť aj s ďalekohľadom krátkej ohniskovej vzdialenosti, pre máloškálové útvary to nie je možné. Máloškálové útvary sa najčastejšie pozorujú do vzdialenosti 2 polomerov Slnka, kde gradient poklesu intenzity svetla koróny podľa klasického vzťahu je veľmi vysoký a jemné štruktúry v jasnejších útvaroch aj tak slabého svetla koróny zanikajú. Pôvodne sa na získanie týchto máloškálových štruktúr používali ďalekohľady s ohniskom od 6 do 10 metrov a z viacerých expozícií, ktoré boli robené s rôznym expozičným časom, sa urobila kresba koróny. Jedna z najlepších štruktúr bielej koróny, získaná takýmto spôsobom, bola kresba koróny zo zatmenia 19. júna 1936 (Bugoslavskaya, 1949). Vsekhsvjatsky a iní (1970) na základe detailnej analýzy snímok bielej koróny zo zatmenia 22. septembra 1968 oznámili, že sa im podarilo na negatívoch snímok identifikovať útvary vo vnútornej koróne s rozlíšením 1 oblúkovej sekundy (asi 700 km), a rovnakého rozmeru aj spikule, pričom koróna by mala byť spojená so spikulami.

November, Koutchmy a Lebecq (1996) na základe 70 mm filmových záberov snímok z 3.6 m kanadsko-francúzsko-havajského ďalekohľadu (Canada-France-Hawaii Telescope) na Mauna Kea oznámili, že sa im počas zatmenia Slnka 11. júla 1991 nad malou protuberanciou nad severozápadným okrajom Slnka podarilo pozorovať svetlé a tmavé slučky a nite s rozmermi okolo 1 oblúkovej sekundy, a pomocou videokamery v spektrálnej čiare 637,0 nm aj super malý útvar, ktorý pomenovali „plazmoid“, s rozmermi len  $0.4 \pm 0.2$  oblúkovej sekundy a so životnosťou okolo 40 s. Viac detailov o máloškálových štruktúrach v bielej koróne uvádza napríklad Koutchmy (1988). Zatmeňové pozorovania emisnej koróny cez úzkopásmové filtre tiež ukazujú na máloškálové štruktúry, napríklad Takeda a Kurokawa (2000). K podobným záverom sa prichádza aj na základe pozorovaní zo SOHO a TRACE, napríklad Aschwanden (2004 a literatúra tam citovaná), ktoré sa získavajú v röntgenovej a extrémne ultrafialovej oblasti spektra (EUV). Nakoniec, rádiové pozorovania zákrytov pomocou Dopplerovho princípu poukázali na veľmi malé (niekoľko desiatok metrov) variácie hustoty (Woo, 1996); intenzita bielej koróny závisí od štvorca elektrónovej hustoty. Dá sa preto očakávať, že aj biela koróna bude zložená z máloškálových (jemných) štruktúr.

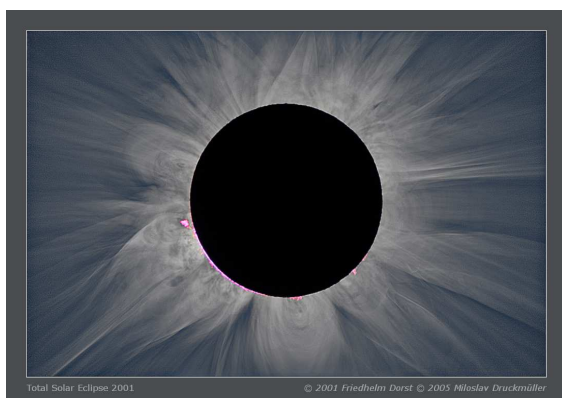
Druhou otázkou je prepojenie chladných protuberancií (T okolo 10 tisíc K) s horúcou korónou (T okolo 1-2 miliónov K). Takéto pozorovania pre svoju náročnosť sú veľmi zriedkavé. Na kresbách zo starších pozorovaní bielej koróny takéto „spojenie“ bolo naznačené, ale nebolo diskutované (Nesmyanovich a iní, 1974). Stellmacher a Koutchmy (1986) takýto prípad pozorovali počas zatmenia Slnka 31. júla 1981. Na základe analýzy prišli k záveru, že „koronálne štruktúry sú zdanlivo spojené s najdynamickejšími a najjemnejšími časťami protuberancií“.

Tretou otázkou, o ktorej sa v stručnosti zmienime, je spojenie bielej koróny s útvarmi na povrchu Slnka a „náhrady“ bielej koróny do 2 polomerov Slnka EUV korónou zo SOHO, ktorá na záberoch z LASCO 2 chýba.

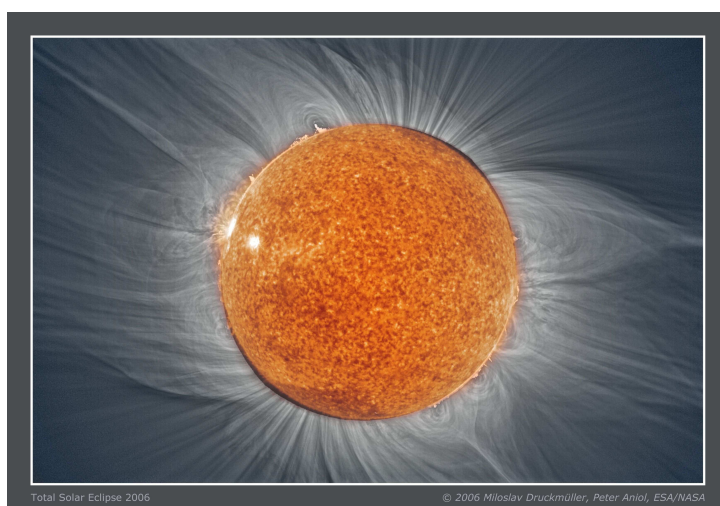
## 2. Pozorovania a spracovania obrazu

V rokoch 2001-2006 sa uskutočnilo viacero úplných zatmení Slnka, pri ktorých sa pozorovala biela koróna. Na získanie štruktúr bielej koróny z týchto zatmení sa použila numerická metóda spracovania obrázkov bielej koróny vyvinutá Druckmüllerom (Druckmüller a iní, 2006). Táto metóda umožňuje získať vysokokvalitné snímky máloškálových štruktúr bielej koróny (ale nielen bielej koróny), prípadne nájsť „prepojenia“ protuberancia - koróna, takmer na úrovni rozlišovacej schopnosti ďalekohľadu. Výhodou tejto metódy v spojení s digitálnymi fotografickými aparátmi alebo CCD snímačmi ešte je, že na získanie jemných štruktúr bielej koróny s rozlíšením okolo 1 oblúkovej sekundy stačí mať ďalekohľad s ohniskom okolo 1,5 metra namiesto ďalekohľadu s ohniskom 7-10 m; taktiež nie je nutné používať radiálny neutrálny filter ako ho navrhol Newkirk (Malville, 1967); úlohou radiálneho filtra je jednou expozíciou získať obraz koróny približne rovnakej hustoty (intenzity) vo veľkom rozsahu nad slnečným povrchom, napríklad od povrchu Slnka do 4 polomerov Slnka.

Biela koróna zo zatmenia 24. júna 2001, spracovaná Druckmüllerovou metódou, je ukázaná na obrázku 1, z 29. marca 2006 na obrázku 2.

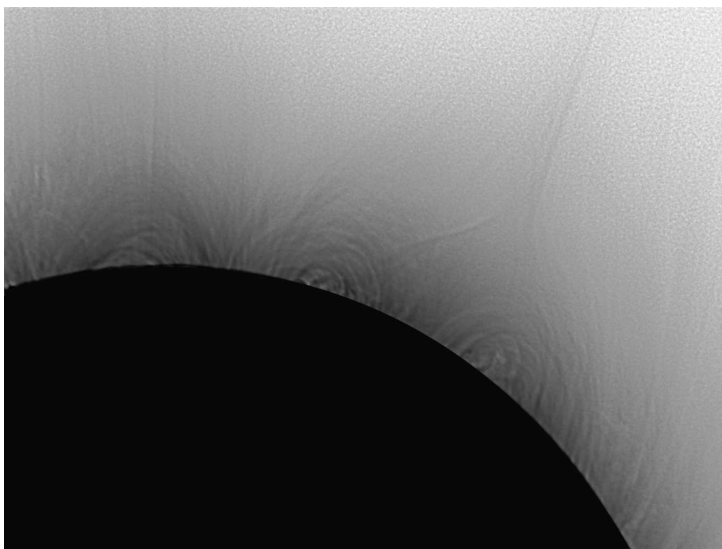


Obrázok 1. Biela koróna z 24. júna 2001, spracovaná Druckmüllerom. (Foto: F. Dorst, Nemecko).

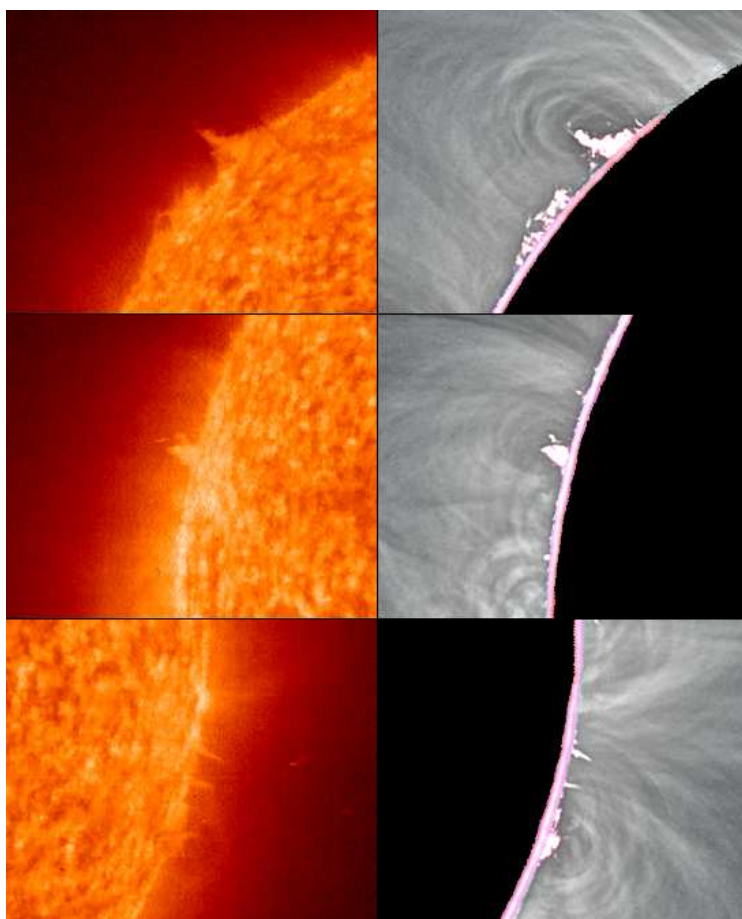


Obrázok 2. Zložený obraz spracovanej bielej koróny a povrchu Slnka v (30.4 nm). Koróna bola získaná P. Aniolom a M. Druckmüllerom v Líbii dňa 29. marca 2006 1,6 m ďalekohľadom. (ESA/NASA/SOHO/EIT).

Ďalší typ máloškálovej štruktúry zo zatmenia 29. marca 2006 je ukázaný na obrázku 3. Koróna sa získala 1,2 m ďalekohľadom a CCD kamerou nad západným okrajom Slnka a jasne tu vidíme systémy svetlých a tmavých slučiek, ako aj tenkých, radiálnych lúčov, ktoré „križujú“ slučky. Autormi tejto snímky sú R. Píffl a I. Majchrovič (Slovensko).



Obrázok 3. Detail bielej koróny nad juhozápadným okrajom Slnka. Snímka je „takmer“ surová, zložená len zo 4 milisekundových expozícií. (R. Piffel a I. Majchrovič, Slovensko).



Obrázok 4. Slnko v čiare HeII (30.4 nm) – ľavá strana a identické oblasti bielej koróny 29. marca 2006, ako ich získal Aniol a Druckmüller v Líba. Chladné protuberancie sú mierne načervenalé, horúce koronálne útvary menej biele, resp. tmavé. (ESA/NASA/SOHO/EIT).

### 3. Výsledky a závery

Detailná analýza snímok 1, 2 and 3 ukazuje veľmi pestrú variabilitu máloškálových štruktúr nielen vo vnútornej koróne, ale aj vo výškach okolo 2 polomerov Slnka. Okrem už popísaných svetlých a tmavých nití (Koutchmy, 1988), sú tam viditeľné aj tmavé bubliny (pozri obrázok 1), prípadne iné tmavé plôšky nepravidelného tvaru (ako

napríklad v tvare S, obrázok 2, vľavo hore) s extrémne nízkou elektrónovou hustotou. Ak totiž vychádzame z predstavy, že elektróny v koróne sa pohybujú iba v hypotetických trubiciach tvorených zväzkom siločiar magnetických polí, potom priestor medzi nimi musí byť „prázdny“. Biela koróna sa totiž sníma v širokom spektrálnom rozsahu, asi 400 – 650 nm, takže potom by mala ukázať všetky zložky koróny – chladné aj horúce. Typickým príkladom potvrdenia tejto myšlienky je obrázok 4, kde pozorujeme súčasne aj chladné protuberancie v čiare H-alfa (načervenalá farba), aj korónu (čiernobiela farba). Detailná prehliadka obrázku 4 súčasne potvrdzuje pôvodné myšlienky Stellmachera a Koutchmyho (1986), že istý typ protuberancií, resp. oddelených uzlov z protuberancie, má svoje pokračovanie v koróne. Otázkou ale zostáva, či takto spojená štruktúra koróny s protuberanciou je chladná alebo horúca. Ako sa o koróne vo všeobecnosti predpokladá, je horúca ( T okolo  $10^6$  K). Vsekhsvyatski a iní (1970) uviedli, že niektoré koronálne lúče (threads) by mali byť pokračovaním makrospikúl. Porovnanie jemných štruktúr na obrázku 4, ktoré sa získali počas zatmenia a zo SOHO (EIT) potvrdzuje, že nejde v žiadnom prípade o efekt projekcie, ale spojenie „protuberancia-koróna“ je realita.

V nedávnej práci Pasachoff a iní (2006) sme na základe porovnania bielej koróny zo zatmenia Slnka 8. apríla 2005 a obrázkov z EIT (SOHO) zistili, že biela koróna v mnohých prípadoch je identická s EUV korónou. K podobnému záveru prichádzame aj pri porovnaní EUV a bielej koróny pri zatmení Slnka 29. marca 2006. To ale znamená, že chýbajúca biela koróna s veľkým rozlíšením pod 2 polomery Slnka môže byť v prvom priblížení nahradená EUV korónou. Spravidla sa biela koróna pod 2 polomery Slnka berie z pozemských pozorovaní, ktoré sa v bielom svetle robia na Manua Loa, koronografom MK IV (Manua Loa Solar Observatory MK IV coronameter), ale rozlišovacia schopnosť je v tomto prípade veľmi nízka. Ak chceme poznať hlbšie príčiny vzniku ejekcií koronálnej hmoty, pozorovaných na SOHO (LASCO), potom poznať dynamiku a štruktúru najvnútornejšej koróny je nevyhnutné. Morgan a Habbal (2007) empiricky študovali 3D model veľkoškálových štruktúr (prilbicovitých lúčov) na základe rozdelenia H-alfa filamentov na slnečnom disku. Napriek tomu, že našli dobrú súvislosť, zdôraznili, že pre zlepšenie svojho modelu je nevyhnutné mať viac informácií o podmienkach v tesnej blízkosti Slnka, čo je možné získať z pozorovaní nielen na SOHO, ale v súčasnosti už aj na HINODE (Tsuneta a iní, 2007; Kano a iní, 2007; Hara a iní, 2007).

V závere našej diskusie by sme sa ešte stručne zmienili o tom, že pozorovanie prilbicovitých lúčov (helmet streamers) s malým rozlíšením ukazuje spojitý pokles intenzity svetla bielej koróny s výškou. Na základe takýchto pozorovaní sa robili aj výpočty pre rozdelenie hustoty a teploty s výškou, kde sa predpokladá stav hydrostatickej rovnováhy. Ak sa však pozrieme na tieto lúče s veľkým rozlíšením (pozri obrázky 1, 2 a 3), homogenita prilbicovitých lúčov je stratená, pretože každý z týchto lúčov je zložený z veľkého množstva tenkých nítí, voči zornému lúču rôzne orientovaných a idúcich ďaleko od povrchu Slnka. Základňu prilbicovitých lúčov tvoria slučky, lokalizované nad neutrálnou čiarou magnetického poľa vo fotosfére. V niektorých lúčoch potom v rôznych výškach nad slnečným povrchom dôjde k spojeniu siločiar do jedného klasického prilbicovitého lúča (pozri obrázok 5). Žiada sa však zdôrazniť, že pokles intenzity v prilbicovitých lúčoch nie je spojitý, ale pripomína kaskády, takže pri modelovaní aj tento fakt bude potrebné zobrať do úvahy.

Vyššie ukázané obrázky koróny a diskutované máloškálové štruktúry (na obrázku 2 asi 1-2 oblúkové sekundy, teda asi 700-1400 km) ukazujú, že biela koróna je naozaj veľmi heterogénna, (napríklad Nesmyanovich a iní, 1974; Koutchmy, 1988; Koutchmy a iní, 1994), s veľkým množstvom štruktúr odlišného tvaru (biele nite, slučky, kruhové bubliny, nepravidelné bubliny, koronálne „prázdnoty“ a pod), v ktorých elektrónová hustota je vyššia/nížšia ako v okolitom priestore a že hlavnú úlohu pri tvorbe koronálnych štruktúr majú magnetické polia na Slnku (Wang a iní, 2007). Táto predstava fragmentovanej, superjemnej (menej ako jedna oblúková sekunda) štruktúry bielej koróny vcelku veľmi dobre súhlasí so subsekundovou štruktúrou vo väčších vzdialenostiach, ako bola určená meraním scintilácie Dopplerovým javom (Woo, 1996).

#### **4. Návrh pre budúce koordinované pozorovania zo Zeme a kozmického priestoru**

Ako bolo vyššie ukázané, biela koróna je veľmi heterogénna, zložená z jemných a superjemných štruktúr. Ukazuje sa aj návaznosť niektorých týchto štruktúr na makrospikule a uzly protuberancií. Nie celkom je známa spojitosť medzi bielou korónou a inými „korónami“, EUV a röntgenovou korónou, či korónou pozorovanou v emisných čiarach vo vizuálnej oblasti spektra. Napríklad, Takeda a Kurokawa (2000) na základe pozorovaní koróny počas zatmenia Slnka z 11. júla 1999 konštatovali, že zelená koróna (530.3 nm, Fe XIV) sa viac podobá na bielu korónu, ako červená koróna (637.4 nm, Fe X). Teplota červenej koróny je asi „len“ 1 milión K.

Aby sa riešili vyššie diskutované otázky, najmä „priviazanie“ štruktúr bielej koróny k fotosféricko/chromosférickým útvarom, vzťah protuberancia-koróna, náhrada bielej koróny EUV korónou v blízkosti slnečného povrchu, bude k tomu jedinečná príležitosť pri nastávajúcich úplných zatmeniach Slnka, 1. augusta 2008 a 22. júla 2009. Navrhujeme počas týchto dvoch zatmení robiť koordinované pozorovania ako prístrojmi na HINODE (všetky druhy), tak aj na SOHO, STEREO a TRACE, a samozrejme pozorovania bielej, resp. emisnej, koróny s veľkým rozlíšením počas zatmenia v páse totality a na existujúcich koronálnych staniaciach na svete.





Obrázok 5. Biela koróna pozorovaná 29. marca 2006 50 cm teleobjektívom v Turecku (H. Druckmüllerová, Brno, Česká republika) a spracovaná Druckmüllerovou metódou (Druckmüller a iní, 2006).

### **PodĎakovanie**

Táto práca bola čiastočne podporená projektom APVT-51-012-704 (Slovensko) a výskumným zámerom MSM0021630518 Ministerstva školstva Českej republiky. Jeden z nás (V.R.) vyjadruje svoje poďakovanie RNDr. E. Markovej, CSc. za jej finančnú podporu pri zabezpečení jeho účasti na 28. medzinárodnom seminári „Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí“ v Úpici.

### **Literatúra**

- Aschwanden, M. J.: 2004, *Physics of the Solar Corona*, Chichester, Praxis
- Bugoslavskaya, E. Ya.: 1949, Trudy GAISH 19
- Druckmüller, M., Rušin, V., Minarovjech, M.: 2006, Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso 36, 131
- Hara, H. a iní: 2007, Publ. Astron. Soc. of Japan, v tlači
- Kano, R. a iní: 2007, Publ. Astron. Soc. of Japan, v tlači
- Koutchmy S.: 1988, in R.C. Altrock (ed.) „*Solar and Stellar Coronal Structure and Dynamics*“, NSO/Sunspot (New Mexico, USA), p. 208
- Koutchmy, S., Koutvisky, V.A., Molodensky, M.M., Solovijev, S.S., Koutchmy, O.:1994, Space Sci. Rev. 70, 283
- Pasachoff, J. M., Kimmel, S. B., Druckmüller, M., Rušin, V. a Saniga, M.: 2006, Solar Physics 238, 261
- Malville, J. McKim.: 1967, Sky and Telescope 33, 136
- Morgan, H., Habbal, S. R.: 2007, Astron. Astrophys. 464, 357.
- Nesmyanovich, A. T., Dzubenko, N. I., Khomenko, Ju. A., Popov, O.S.: 1974, Astron. Zh. 51, 517
- November, L., Koutchmy, S., Lebecq, Ch.: 1966, Astrophys. J. 466, 512
- Stellmacher, G., Koutchmy, S.: 1986, Astron. Astrophys. 162, 307
- Vsekhsvjatsky, S.K., Dzubenko, N. I., Ivanchuk, V. I., Rubo, G.A.: 1970, Solnechnyje Dannyje 9, 88
- Takeda, A., Kurokawa, H.: 2000, Publ. Astron. Soc. Japan 52, 375
- Tsuneta, S. a iní: 2007, Publ. Astron. Soc. Japan, v tlači
- Wang, Y.-M., Biersteker, J.B., Sheeley, N.R. Jr., Koutchmy, S., Mouette, J., Druckmüller, M.: 2007, Astrophys. J. 660, 882
- Woo, R.: 1996, Nature 379, 321