

Vzťahy medzi zatmeňovou "bielou" korónou a magnetickým poľom v priebehu slnečného cyklu

*J. Sýkora, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, sykora @ta3.sk
O.G. Badalyan, IZMIRAN, Troitsk, Rusko, badalyan @izmiran.troitsk.ru
V.N. Obridko, IZMIRAN, Troitsk, Rusko, obridko @izmiran.troitsk.ru*

Abstrakt

Pozorovania 10-tich zatmení Slnka (1973-1999) nám umožnili odhaliť a popísať vzájomné vzťahy medzištruktúrami „bielej“ koróny (SBK), pozorovanej v spektrálnom kontínuu, na jednej strane (napríklad, celkovým tvarom koróny a najvýraznejšími koronálnymi útvarmi, akými sú prilbicovité strímery a koronálne diery), a intenzitou a topológiou koronálneho magnetického poľa (KMP), na strane druhej. Intenzitu a topológiu KMP sme extrapolovali z meraní magnetického poľa (MP) na úrovni slnečnej fotosféry, predpokladajúc bezsilový (potenciálový) charakter poľa v koróne. Napriek takémuto zjednodušeniu, nájdený súhlas medzi SBK a organizovanosťou KMP silne podporuje domnienku o riadiacej úlohe KMP pri vzniku a evolúcii ako lokálnych, tak aj globálnych, koronálnych štruktúr. Naša analýza tak zároveň potvrdzuje, že štúdiom SBK počas dlhého obdobia možno obdržať cenné informácie o cyklických zmenách KMP. Toto je zvlášť významné pre tie obdobia, kedy sa odpovedajúce pozorovania fotosférického MP ešte nevykonávali.

1. ÚVOD

"Život" slnečnej koróny je do značnej miery predurčovaný magnetickým poľom. Intenzita a organizovanosť (štruktúrovanosť) MP jasne predznamenávajú prítomnosť rôznych koronálnych útvarov (koronálne strímery, diery, lúče, kondenzácie, a pod.), ako aj globálny tvar zatmeňovej koróny, a dokonca, polohu hél iosferickej bezprúdovej vrstvy (de facto, rovni ka hél iosférického MP).

Doteraz neboli vyvinuté žiadne priame metódy merania KMP, preto je štúdium MP vo vrstve od fotosféry do tzv. zdrojovej plochy (obyčajne ju situujeme do vzdialenosti $2,5 R_{\odot}$) sťažené. Existujú určité metódy teoretických výpočtov KMP, ktoré sa vykonávajú za špecifických predpokladov, napríklad, o bezsilovom, resp. potenciálovom charaktere MP, a ich základom je rozloženie MP namerané na povrchu fotosféry. Určitý odhad KMP možno získať aj z meraní v odbore rádiových vln, tiež však za určitých zjednodušujúcich predpokladov o ch raktere žiarenia (viď, napríklad, Gelfreikh a kol., 1997; Grebinskij a kol., 2000). Okrem toho, rádio-pozorovania umožňujú urobiť odhad MP len v oblastiach najsilnejších polí, t.j., nad slnečnými škvrnami.

Úzky vzťah medzi slnečnými MP a štruktúrovanosťou koróny nám umožňuje pochopiť mnoho o KMP. Zvlášť cennou sa javí možnosť študovať veľkorozmerné štruktúry KMP a ich cyklické zmeny. K tomu je treba dobre preskúmať

súvislosti medzi SBK a KMP v priebehu cyklu slnečnej činnosti.

V súčasnosti podstatnú časť poznatkov o slnečnej koróne získavame z kozmických družíc YOHKOH, SOHO a TRACE. údaje o röntgenovom žiarení umožňujú detailne študovať vrstvy vnútornej koróny. Korónografy LASCO na družici SOHO dovoľujú registrovať korónu v rozmedzí $2-30R_{\odot}$, čo umožňuje skúmať jednotlivé koronálne strímery do veľmi veľkých vzdialeností. Neobsiahnutou kozmickými prístrojmi zostáva oblasť bielej koróny (BK) v intervale $1-2 R_{\odot}$, t.j. práve oblasť, pre ktorú možno výpočtom najspolahlivejšie určovať KMP. Za zmienku tiež stojí, že spomenuté kozmické pozorovania pokrývajú len časť 22. a prebiehajúci 23. cyklus slnečnej činnosti.

Fotografické pozorovania BK sa vykonávajú už počas úplných zatmení Slnka už v priebehu viac ako 100 rokov. Detailne bol, napríklad, preskúmaný celkový tvar slnečnej koróny a jeho zmeny so slnečným cyklom. Niekoľkí autori zostavili dokonca určité katalógy štruktúrálnych obrázkov zatmeňovej koróny (Vsekhsvyatsky a kol., 1965; Loucif, 1988; Loucif a Koutchmy, 1989).

Systematické pozorovania fotosférických MP s dobrým priestorovým rozlíšením, pokrývajúce celý slnečný disk (čo je nevyhnutné pre spoľahlivé výpočty KMP) sú k dispozícii počínajúc 21. cyklom. Do tej doby, na konci 19. cyklu a počas celého 20. cyklu aktivity existujú merania fotosférického MP na rôznych observatóriách, žiaľ, prevádzané rôznymi metódami. Ich štandardizácia predstavuje zložitú úlohu (Obridko a Shelting, 1999a). Pre

ešte

skoršie obdobie možno údaje o MP s určitou spoľahlivosťou rekonštruovať na základe existujúcich synoptických -máp (Vasilieva a Tlatov, 2002). Pritom, pravdu povediac, sa rekonštruuje iba polarita (znamienko) MP na úrovni fotosféry a spodnej chromosféry.

Ešte raz chceme zopakovať, že analyzujúc SBK, ako aj celkový tvar koróny, pozorovanej počas určitého zatmenia Slnka, možno pomerne veľa povedať o vlastnostiach a parametroch samotného KMP. Tento náš článok je zameraný práve týmto smerom.

Naše pozorovania pokrývajú obdobie 1973-1999, počas ktorého bolo úspešne odpozorovaných desať úplných zatmení Slnka. Deväť z nich pripadá na obdobie, kedy už sú k dispozícii spoľahlivé rovnomerné merania fotosférického MP. Všetky zatmeňové pozorovania a ich spracovanie boli prevedené podľa podobnej metodiky a tiež predstavujú homogénny materiál. Zatmenia 1997, 1998 a 1999 patria k stúpajúcej vetve 23. cyklu, ktorý je v súčasnosti intenzívne študovaný.

Počas zatmení sme obyčajne získavali snímky bielej koróny a polarizované snímky, ako v spektrálnom kontínuu, tak aj vo svetle najjasnejšej optickej emisnej koronálnej čiary Fe XIV 530,3 nm (tzv. "zelená" koronálna čiara). Vedecký program bol zameraný na dve témy: (a) štúdium vzťahu medzi veľkorozmernými SBK a vypočítaným KMP a zmeny celkového tvaru BK s fázou slnečného cyklu; (b) Interpretácia meraní polarizácie v závislosti od magnetického typu príslušnej veľkorozmernej koronálnej štruktúry (koronálne strímery, koronálne diery, polárne lúče, a pod.). Pokiaľ ide o podrobné (stále ale čiastkové) výsledky v rámci uvedených dvoch tém, možno doporučiť nasledovné naše základné články: (a) Sýkora a kol. (1998, 1999) a Sýkora a kol. (2002); (b) Badalyan a Sýkora (1997); Badalyan a kol. (1997, 1999); Badalyan a kol. (2002a, b).

Berúc do úvahy všetkých 10 zatmení, má tento článok za cieľ podať ucelenejší obraz o tesnej vzájomnej súvislosti medzi štruktúrami, veličinami a vývojom BK a KMP, s dôrazom na radiáciu úlohu úlohu KMP v tomto vzťahu. Na tento účel sme použili rôzne formy prezentácie MP: v tvare synoptických máp, rozloženia otvorených a zatvorených siločiar MP na povrchu Slnka, a tiež trojrozmernú štruktúru siločiar a izočiar intenzity KMP

v projekcii do obrazovej roviny. Takéto prístupy dovoľujú určiť, akými základnými harmonickými členmi MP sa dajú najlepšie popísať pozorované SBK a globálne tvary BK. Per analogiam, opierajúc sa o štruktúrne obrázky zatmeňovej BK, je potom možno určiť základné harmoniky MP Slnka do vzdialenejšej minulosti.

2. POZOROVACÍ MATERIÁL A POSTUP PRI VÝPOČTOCH

Podstatné informácie o 10-tich zatmeniach Slnka v období 1973-1999 sú uvedené v tabuľke 1 a na obr. 1. Menovite uvádzame dátumy zatmení, miesto pozorovania, fázu cyklu určenú podľa Mitchell-a (1929) ako $\Phi = (T - m)/(|M - m|)$, kde T je moment zatmenia, M a m sú momenty maxima a minima 11-ročného cyklu. V poslednom stĺpci uvádzame veľkosti sploštenia koróny ϵ , určené štandardným spôsobom podľa Ludendorff-a (1928). Popis výpočtu

ϵ vid', napríklad, v Sýkora a Ambrož (1995).

KMP bolo počítané za predpokladu potenciálovej aproximácie z meraní pozdĺžnej zložky fotosférického MP, prevádzaných na Wilcox Solar Observatory (WSO). Niektoré konkrétne detaily našich výpočtov možno nájsť v Ivanov a Kharshiladze (1994) a Sýkora a kol. (1999).

V tomto článku sme využili najmä výsledky výpočtu celkovej intenzity magnetického poľa B a jej zložiek. Zostrojili sme synoptické mapy radiálnej zložky B_r na zdrojovej ploche, na ktorých je znázornená aj poloha neutrálnej čiary (predstavujúca magnetický rovník, resp. základňu hél iosférickej bezprúdovej vrstvy) a tiež poloha niektorých iných izočiar. Na mapách sú, okrem toho, znázornené miesta otvorených siločiar MP, v ktorých sú „ukotvené“ vo fotosfére.

Aby sme mohli porovnať tvar BK s topológiou KMP, museli sme vypočítať štruktúru siločiar KMP. Pritom sme využili dve možnosti takých výpočtov. Prvý spôsob spočíva v tom, že sa zadá rovnomerná sieť bodov na dolnej hranici koróny a počítajú sa otvorené a zatvorené siločiar y vychádzajúce z týchto bodov. Časť siločiar sa pritom vracia a uzatvára sa vo fotosfére, vôbec nedosahujú zdrojovú plochu, zatiaľčo iná časť siločiar sa dvíha do úrovne $2,5 R_{\odot}$ a uniká ďalej do medziplanetárneho priestoru. Pretože oblasti s otvorenými siločiarami zaberajú pomerne malú časť povrchu fotosféry, na príslušných obrázkoch sú vidieť najmä štruktúry s uzatvorenými siločiarami. Štruktúrovanosť otvorených siločiar lepšie ilustruje druhý variant výpočtov. Východzu pri ňom je sieť rovnomerne rozložených bodov na zdrojovej ploche, kde podľa definície sú všetky siločiar y otvorenými a každú siločiaru môžeme sledovať až do jej dotyku s fotosférou.

3. TVAR BIELEJ KORÓNY A KORONÁLNE MAGNETICKÉ POLE

Pozorované tvary BK a niektoré charakteristiky topológie KMP prezentujeme na obr. 2. Zatmenia na ňom nie sú usporiadané v chronologickom poradí, ale podľa narastania fázy cyklu Φ (vid' tabuľku 1). V prvom stĺpci obr. 2 sú kresby štruktúr jednotlivých korón, vytvorené známou metódou kombinácie negatív/pozitív a ich vzájomným pootočením o veľmi malý uhol. Na obrázku je vidieť ako sa mení tvar koróny od sploštenej – „minimovej“ ku kvázi-kruhovej - typickej pre maximum slnečného cyklu. V druhom stĺpci sú štruktúry otvorených siločiar MP, vypočítané pre východziu sieť bodov na zdrojovej ploche (vid' vyššie).

V treťom stĺpci obr. 2 sú štruktúry izočiar intenzít MP, tzv. izogaussy. Podobný spôsob prezentácie stavu KMP

bol použitý už skôr Gibson a Bagenal (1995), a aj my sme ho použili v Sýkora a kol. (1999). Absencia izogaus nad slnečnými pólmi je dôsledkom známej nemožnosti merať fotosférické MP v oblastiach nad 70° heliografickej šírky. V poslednom stĺpci obr. 2 uvádzame synoptické mapy intenzity MP s identifikáciou miest, kde sú otvorené siločiarly MP ukotvené do fotosféry (malé prázdne krúžky). Treba poznamenať, že synoptické mapy sú konštruované tak, že deň zatmenia je totožný s centrálnym meridiánom. Inak povedané, uvedné heliografické dĺžky nie sú Carringtonovskými dĺžkami. Okrem toho je zrejme, že heliografické dĺžky 90° a 270° predstavujú východný a západný okraj Slnka v deň zatmenia.

V prípade všetkých zatmení možno konštatovať pomerne dobrý súhlas veľkorozmerných koronálnych štruktúr s topológiou KMP. Ako je vidieť z porovnania 1. a 2. stĺpca obr. 2, otvorené siločiarly MP veľmi dobre súhlasia s celkovým tvarom koróny v rokoch 1991, 1973, 1983, 1994 i 1995. Dobrý je aj ich vzájomný súhlas v rokoch 1980, 1981, 1997 i 1999. O niečo horší je súhlas v prípade zatmenia 1998. Možno je to ovplyvnené skutočnosťou, že pozorovania WSO boli k dispozícii len za dni 24. februára a 2. marca 1998, proto bolo možné polohu neutrálnej čiary veľkorozmerového MP, vplyvajúcu na polohu strímerov, určiť nedostatočne presne. Vcelku však možno povedať, že nami použitá metóda výpočtu KMP je veľmi vhodná pre identifikáciu základných vlastností globálnej štruktúry koróny. Z toho možno vyvodiť, že aj naopak, údaje o štruktúre koróny dovoľujú, prinajmenšom kvalitatívne, charakterizovať štruktúru koronálneho MP.

V súvislosti so zatmením 1998 sa žiada uviesť, že táto koróna mala prekvapujúco sploštený minimový tvar. Takýto tvar by bol pravdepodobne pozorovaný pre každú zatmeňovú korónu až do apríla 1998. Wang a kol. (2000) to vysvetľujú detailným popisom evolúcie systému koronálnych strímerov (tie hlavne vplyvajú na globálny tvar koróny) a náhlou prestavbou topológie tohoto systému od mája 1998. Analýza našich synoptických máp KMP na zdrojovej ploche potvrdzuje, že naozaj, od augusta 1996 až po august 1997 heliosférická toková vrstva mala veľmi plochý nezvlhnený tvar. Jej náklon k slnečnému rovníku neprevyšoval $10^\circ - 15^\circ$. Potom, v auguste-septembri 1997 tento náklon dosiahol 45° a neskôr sa znova zmenšil na $20^\circ - 30^\circ$. Až v apríli 1998 sa náklon prudko zväčšil na 60° a viac, čím sa priblížil k hodnotám charakteristickým pre maximálnu fázu cyklu lokálnych polí. Hoci bol kvázi-maximálny tvar koróny, so strímerami situovanými blízko slnečných pólů, dosiahnutý rýchlo (viď odpovedajúcu kresbu koróny pre zatmenie 11. augusta 1999 na obr. 2), predsa len, úplne typický maximálny tvar koróny s veľkým počtom strímerov okolo celého Slnka bol dosiahnutý až počas zatmenia 21. júna 2001, ktoré sme nepozorovali a neprezentujeme ho v tomto článku.

Izočiarly intenzity MP (tretí stĺpec na obr. 2 sú stlačené na magnetickom rovníku a vytiahnuté na

magnetických pólů. Toto sa zvlášť výrazne prejavuje pri korónach minimového typu (zatmenia 1994, 1995, 1997), a tiež v prípade výnimočne orientovanej koróny, pozorovanej počas zatmenia 11. júla 1991. Hoci tento dátum je blízko maxima 22. cyklu slnečnej aktivity, predsa koróna svojim evidentne splošteným tvarom výrazne pripomínala korónu minimového typu, avšak s vysokoširokými strímerami silno naklonenými k heliografickému rovníku. Súviselo to s výnimočne veľkým sklonom osi hlavného magnetického dipólu k rotačnej osi Slnka, ako aj so špecifickým pootočením tohoto dipólu tak, že jeho rovník sme videli akoby „z hrany“. K súčasnému

splneniu oboch takýchto podmienok dochádza veľmi zriedka, a tak aj koróna podobného tvaru je v danej primaximovej fáze cyklu veľmi málo frekventovaná (Gulyaev a Vanyarkha, 1992).

Majúc na pamäti určitú zhodu medzi pozorovanými tvarmi koróny a KMP, reprezentovaným izočiarlami jeho intenzity B , bolo zaujímavé skúmať, pomocou ktorých členov harmonického rozvoja MP možno najlepšie popísať pozorované tvary BK. Na obr. 3 sú znázornené izogaussy niekoľkých základných multipólov MP - dipólu, kvadrupólu a oktapólu. Vo všetkých prípadoch bola pri výpočte prijatá rovnaká hodnota magnetického momentu, rovná $50 \mu T$. Na obr. 3 sú izogaussy ukázané len pre jednu - východnú pologulu Slnka. Je zrejme, že na západnej pologuli by bolo rozloženie izogauss kruhovo-symetrickým. Pre výpočet jednotlivých komponent MP sme použili známe vzorce (Hoeksema a Scherrer, 1986; Hoeksema, 1991). Ako príklad tu uvedieme vzorce pre výpočet radiálnej B , a pozdĺžnej B_θ zložky poľa pre prípad dipólu a kvadrupólu, pričom sa predpokladá, že ich osi sú totožné s osou rotácie Slnka. V tomto prípade je zložka B_θ nulová a celková intenzita MP je $B = \dots\dots\dots$. Ako pri všetkých našich výpočtoch, aj tu sme predpokladali, že polomer zdrojovej plochy je rovný $2,5 R_\odot$. A tak pre dipól

(1)

(2)

a pre kvadrupól

(3)

(4)

kde g_{10} a g_{20} sú koeficienty sférickej harmonickej analýzy, odpovedajúce v danom prípade magnetickým momentom dipólu a kvadrupólu.

Porovnanie obr. 2 a 3 ukazuje, že niektoré rozloženie izogauss možno pomerne dobre popísať len jednou zložkou celkového MP koróny. Tak, napríklad, tvary koronálnych izogauss v období minim slnečnej aktivity sa podobajú dipólovému rozloženiu (zatmenia 1973, 1994, 1995, 1997). K tomuto typu možno zaradiť aj korónu 1991, tvar ktorej je podobne sploštený, ale súčasne silno naklonený. Zdá sa, že do koronálneho MP pri zatmeniach 1983 a 1998 značne prispievala aj kvadrupólová zložka. V niektorých prípadoch je tiež badateľný vplyv nasledujúcej, oktapólovej zložky. Z porovnania obr. 2 a 3 možno urobiť záver, že vhodná kombinácia uvedených troch multipólov globálneho MP Slnka umožňuje aproximovať tvar izogauss každého konkrétneho zatmenia. Samozrejme, predstavuje to zložitú a v obecnom prípade nejednoznačnú úlohu. Je tiež zrejme, že v prípade skladania dvoch, alebo

niekoľkých multipólov, výsledný tvar izogauss nemožno obdržať len jednoduchým zložením izogauss jednotlivých multipólov.

Inú, zaujímavú vlastnosť izogauss predstavujú určité nevelké „vypukliny“ na niektorých úsekoch pozičných uhlov (viď, napríklad, zatmenia 1983, 1995 a 1999). Porovnanie polohy takých vypuklín na izogaussách so synoptickou mapou, na ktorej sú znázornené polohy otvorených siločiar MP vychádzajúce z dolnej koróny, dovoľuje konštatovať, že vypukliny v systéme izogauss (t.j., oblasti zvýšenej intenzity MP) dobre korelujú s polohou koronálnych dier, nachádzajúcich sa na, alebo neďaleko od slnečného okraja (viď heliografické dĺžky 90° a 270°). Napríklad, izogassy zatmenia 1983 ukazujú takú vypuklinu v oblasti západného rovníka a na príslušnej synoptickej mape sa tam nachádzajú malé krúžky indikujúce v našom označení polohu otvorených

siločiar vo fotosfére. Je známe, že poloha otvorených siločiar predstavuje, v podstate, polohu koronálnych dier (Wang a kol., 1996; Obridko a Shelting, 1999b). Podobnú situáciu možno vidieť aj v prípade zatmenia 1995.

V prípade koróny 1999 sa výrazná vypuklina v rozložení izogauss nachádza okolo pozičného uhla $\sim 30^\circ$. Na príslušnej synoptickej mape MP sa na tomtom mieste východného limbu nachádza značné nahromadenie krúžkov. štruktúrny obrázok koróny 1999 na tomto mieste ukazuje lúčovitú štruktúru, typickú pre prítomnosť koronálnych dier. O niečo menej výrazná vypuklina sa nachádza v NW-kvadrante, čo odpovedá oblasti $\sim 310^\circ$ na synoptickej mape. A nakoniec, ešte menej výrazná vypuklina v SW-kvadrante súvisí so zhlukom krúžkov situovaným za limbom.

Stojí za zmienku, že podobné vypukliny v rozložení izogauss vidno aj na obr. 3 v prípadoch kvadrupólu a okupólu. Je možné, že aj výskyt koronálnych dier, situovaných spravidla na miestach zvýšenej intenzity MP, geneticky súvisí s týmito multipólmi. Súčasne, globálny tvar slnečnej koróny je predurčený existenciou globálneho dipólu MP. V tomto prípade sa rozsiahle koronálne diery nachádzajú okolo magnetických pólov dipólu. V minimách slnečných cyklov póly dipólu a príslušné koronálne diery sú takmer identické s heliografickými polárnymi oblasťami. Avšak, vo zvláštnom prípade zatmenia 1991, kedy magnetický dipól bol silno naklonený, bola malá koronálna diera pozorovaná v blízkosti jedného z magnetických pólov v NW-kvadrante a, súčasne, oblasť značne zníženej intenzity bielej koróny a slabú emisiu v zelenej čiare (obe typické pre prítomnosť koronálnych dier) bolo vidieť okolo opačného pólu (viď štruktúrny obrázok tohoto zatmenia na obr. 2).

Treba ešte poznamenať, že vypočítaná intenzita MP pre zatmenie 1973 sa dosť výrazne líši od iných zatmení. Je to najpravdepodobnejšie preto, že východzie údaje pre výpočet sme nemali k dispozícii z WSO, ale z Mount Wilson Observatory. Hoci sme urobili maximum pre hladký prevod všetkých údajov

pozorovaní na jednotný systém, predsa sme sa určitých zvyškov nehomogenity celkom nezbavili. Na druhej strane to znamená, že detailné porovnanie počítaného MP s pozorovanou štruktúrou bielej koróny pri jednotlivých zatmeniach, môže byť doplnkovým testom dobrej syntézy rôznych magnetických meraní pri vytváraní homogénneho súboru údajov.

4. POLARIZOVANÁ KORÓNA A MAGNETICKÉ POLE

Už vyššie sme sa zmienili o zaujímavej a svojim spôsobom neobyčajnej koróne pozorovanej počas zatmenia Slnka 11. júla 1991. V priebehu tohoto zatmenia sme získali obrázky koróny ako v optickom kontínuu (biele svetlo), tak aj v tzv. zelenej emisnej čiare a tiež polarizované snímky v týchto spektrálnych odboroch (Sýkora a Badalyan, 1992; Badalyan a kol., 1997, 1999). Porovnanie izofot bielej koróny s izogaussami (izočiarami *B*), vypočítanými pre deň zatmenia 1991 (Sýkora a kol., 1999) ukázalo, že izofoty aj izogaussy vytvárajú dva systémy vzájomne kolmých kriviek. Toto je dobre vidieť na dvoch horných paneloch obr. 4. Pre niektoré iné zatmenia bola podobná situácia demonštrovaná v Sýkora a kol. (2002).

Polarizačné merania vykonané v bielom svetle a emisných koronálnych čiarach poskytujú cenné informácie o fyzikálnych podmienkach v koróne, predovšetkým o hustotnom rozložení v nej. Zvlášť, ako sme ukázali v Badalyan a kol. (1993, 1997) a Badalyan a Livshits (1994), polarizačné merania, spolu s teoretickými úvahami, umožňujú popísať rozloženie koronálnej hmoty pozdĺž zorného lúča. Napríklad, vysoký stupeň polarizácie v dobre definovaných koronálnych strímery nemožno, pri reálne nameranej jasnosti koróny, interpretovať v rámci sféricky symetrického modelu koróny. Naopak, v týchto miestach je potrebné predpokladať určitú koncentráciu koronálnej plazmy k rovine obrazu. V pokojných oblastiach, akými sú koronálne diery, predpoklad sférickej symetrie umožňuje uspokojivo vysvetliť všetky namerané parametre.

Na dolných paneloch obr. 4 možno detailne porovnať koronálne štruktúry (vľavo) so štruktúrami siločiar magnetického poľa (vpravo) pre zatmenie 11. júla 1991. Vľavo dole prezentujeme kombinovaný obrázok, ktorý umožňuje sledovať jednotlivé koronálne štruktúry od vnútornej koróny až do jej vonkajších vrstiev. Na tomto obrázku sú štruktúry strednej a vonkajšej koróny vizualizované pomocou polarizačnej mapy, odvodené z polarizačných snímok v bielom svetle. Izočiarly stupňa polarizácie (izoplety) sú pritom vykreslené čierno-bielou gradáciou s krokom 5%. Tákato prezentácia jasne zviditeľňuje nielen najvýraznejšie veľkorozmerné koronálne štruktúry (akými sú, napríklad, vysoko-širokové strímery a severná koronálna diera), ale aj oveľa drobnejšie útvary na západnom limbe. Vnútorňa koróna na obr. 4 je prezentovaná pomocou počítačovo spracovaného snímku, ktorý sme získali pomocou úzkopásmového filtra s pološírkou priepustnosti $\Delta\lambda = 0.17$ nm centrovaného na zelenú koronálnu čiaru Fe XIV 530,3 nm. Vyznačená je poloha Slnka a jeho stred v momente snímku.

Najvnútornejšie časti slnečnej koróny boli, samozrejme, zakryté Mesiacom počas tohoto dlhotrvajúceho zatmenia.

Obr. 4 dokumentuje prekvapivo dobrý súhlas medzi štruktúrami vnútornej koróny, viditeľnými v zelenej emisnej čiare a štruktúrami strednej a vonkajšej bielej koróny, nachádzajúcimi sa na polarizačnej časti obrázka. Možno vidieť ako izoplety dobre vykresľujú hranice mohutných vysokošírkových strímerov v NE a SW kvadrantoch, pričom „predĺženie“ týchto čiar pokračuje do poltónovej časti obrázka, kde načrtáva štruktúry vnútornej koróny. V oblastiach nízkych širok SW-kvadrantu, kde sú prítomné početné drobné koronálne lúče, izoplety majú silne členitý tvar. Vo vnútornej časti pod touto vzorkou možno vidieť podobnú štruktúru, prislúchajúcu rovníkovým kondenzáciám na západnom limbe. Na východnom okraji, vedľa vysokošírkového strímera bližšie k rovníku, bol na pozičnom uhle 60° pozorovaný krátky jasný strímer s koronálnou kondenzáciou v jeho základni. Na tomto mieste obr. 4 vidíme tvar tohoto strímera z priebehu izoplet, zatiaľčo vo vnútornej časti obrázka vidno akoby hornú hranicu koronálnej kondenzácie, prechádzajúcu ďalej k hrane vysokošírkového NE-strímera.

Niektoré z vyššie uvedených charakteristík možno identifikovať aj v štruktúre siločiar magnetického póla. Pravý dolný panel obr. 4 znázorňuje detailnú štruktúru týchto siločiar (uzatvorený systém siločiar - vid' kapitolu 2). Neutrálna čiara MP, vypočítaná pre zdrojovú plochu a projektovaná na povrch fotosféry $r = 1,0$ je znázornená hrubšou čiarou. Táto čiara prakticky spája slnečné póly (vid' aj synoptickú mapu na obr. 2). Najcharakteristickejšími štruktúrami sú tu arkáda oblúkov nad neutrálnou čiarou a siločiar MP vykresľujúce dva systémy mohutných strímerov v NE- a SW-kvadrantoch. Je zreteľné, že siločiar vytvárajú vysoké uzatvorené oblúky v oblastiach vysokošírkových strímerov, kde sa izoplety javia takmer radiálnymi. Naopak, v oblastiach rovníkových koronálnych kondenzácií uzatvorené siločiar "siahajú" iba do pomerne malých výšok, pričom izoplety sú, v podstate, rovnobežné k slnečnému limbu. Tieto a iné vlastnosti, odhalené pri porovnávaní dvoch dolných panelov obr. 4 demonštrujú, že polarizačné merania bielej koróny môžu veľmi dobre poslúžiť pri detailnom porovnávaní SBK s topológiou KMP.

5. ZÁVERY

Tvary (formy) bielej koróny, odvodené z uniformných pozorovaní zatmení Slnka v období 1973-1999, sme porovnávali s variáciami globálnej konfigurácie a intenzity koronálneho MP. Topológia siločiar, rozloženie izočiar intenzity póla B a synoptické mapy MP sme počítali za predpokladu bezprúdového charakteru póla prevážne z jeho fotosférickych meraní na WSO. Ukazujeme, že v skúmanom období cyklické zmeny globálneho

koronálneho tvaru dobre súhlasia so zmenami globálnej štruktúry magnetických siločiar.

Izočiar (izogaussy) B sú natiahnuté v smere magnetických pólov a stlačené k magnetickému rovníku. Izofoty bielej koróny a izogaussy MP tvoria dva systémy uzatvorených a vzájomne kolmých kriviek. Charakteristické vypukliny na izogaussách sa objavujú na miestach, kde sa nachádzajú koronálne diery na, alebo v blízkosti, slnečného okraja. V tomto prípade koronálne diery boli identifikované ako oblasti, v ktorých sú otvorené siločiar koronálneho MP ukotvené do fotosféry. Počítali sme izogaussy pre základné harmonické zložky globálneho magnetického póla - dipól, kvadrupól a oktapól. Rôzne kombinácie týchto multipólov dovoľujú, v podstate, popísať ľubovoľný pozorovaný globálny tvar koróny.

Zaznamenali sme skoro perfektný súhlas medzi individuálnymi štruktúrami bielej koróny a útvarmi zatvorených magnetických siločiar. Štruktúry, ktoré vidno v strednej a vonkajšej bielej koróne sú tiež dobre vykreslené izopleťami (čiarami rovnakého stupňa polarizácie), zatiaľčo štruktúry vnútornej koróny sú zreteľné na počítačovo zvýraznených obrázkoch, nasnímaných vo svetle emisnej koronálnej čiar Fe XIV 530,3 nm. Konštatujeme aj výnimočne dobrý súhlas štruktúr vnútornej „zelenej“ koróny so štruktúrami vonkajšej „bielej“ koróny.

Dobre známa závislosť sploštenia koróny na fáze slnečného cyklu sa zdá byť seriózne spochybnená v priebehu posledného desaťročia. Spolu s inými autormi (Gulyaev, 1992, 1994; Sýkora a Badalyan, 1992; Sýkora a kol., 1998, 1999) sme toho názoru, že Ludendorffova definícia sploštenia slnečnej koróny (Ludendorff, 1928) a všeobecne akceptované zmeny tvaru koróny v priebehu slnečného cyklu (vid', napríklad, Golub a Pasachoff, 1997) sú do značnej miery fiktívne. V skutočnosti, slnečná koróna je veľmi pravdepodobne vždy sploštená, ale toto sploštenie je realizované skôr k slnečnému magnetickému rovníku než k heliografickému rovníku. Avšak výpočet koronálneho sploštenia 8#8 smerom k magnetickému rovníku predstavuje oddelený nie ľahký problém.

Porovnanie globálnych štruktúr bielej koróny s parametrami koronálneho MP (štruktúrou siločiar póla, rozložením intenzity MP B a B_r , synoptickými mapami) ukázalo na ich vzájomnú dobrú korešpondenciu. Možno sa preto nádejať, že zatmeňové pozorovania koróny, realizované v priebehu viac než storočia, by mohli byť nepriamym zdrojom informácie o dlhodobej evolúcii globálneho slnečného MP za uvedené obdobie. V tomto kontexte, starostlivé štúdium popisov zatmení v starých kronikách, by takisto mohlo byť zdrojom užitočnej informácie pre odhalenie určitých zmien slnečného MP v ďalekej minulosti, dávno pred vznikom slnečnej fyziky a fyzikálnych meraní.

POĎAKOVANIE

Autori si pokladajú za povinnosť poďakovať sa za podporu z VEGA Grantu 2/1022/21 Slovenskej akadémie

vied a Grantu č. 02-02-16199 Ruského fondu základného výskumu. ďakujeme aj pracovníkom Wilcox Solar Observatory za údaje o slnečných magnetických poliach a T. Pintérovi zo Slovenskej ústrednej hviezdárne za spoluprácu pri pozorovaniach zatmení č. 6-8 (viď tabuľku 1).

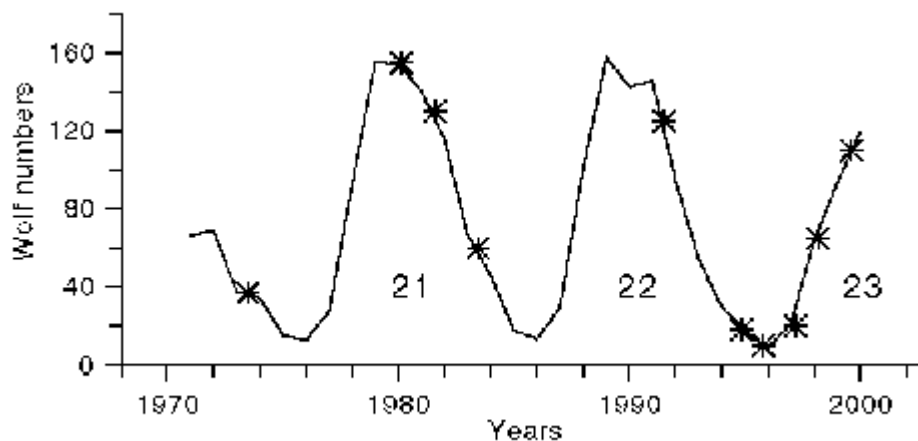
Literatúra

Badalyan, O.G., Livshits, M.A., 1994, in 'Solar Coronal Structures', eds. V. Rušin, P. Heinzel, J.-C. Vial, Veda, Bratislava, 77
 Badalyan, O.G., Sýkora, J., 1997, Astron. Astrophys., 319, 664
 Badalyan, O.G., Livshits, M.A., Sýkora, J., 1993, Solar Phys., 145, 279
 Badalyan O.G., Livshits M.A., Sýkora J., 1997, Solar Phys., 173, 67
 Badalyan, O.G., Livshits, M.A., Sýkora, J., 1999, Astron. Astrophys., 349, 295
 Badalyan, O.G., Obridko, V.N., Sýkora, J., 2002a, Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso, 32, 49
 Badalyan, O.G., Obridko, V.N., Sýkora, J., 2002b, Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso, 32, in press.
 Gelfreikh, G.B., Pilyeva, N.A., Ryabov, B.I., 1997, Solar Phys., 170, 253
 Gibson, S.E., Bagenal, F., 1995, J. Geophys. Res., 100, 19865
 Golub, L., Pasachoff, J.M., 1997, 'The Solar Corona', Cambridge Univ. Press, Cambridge, 110
 Grebinskij, A., Bogod, V., Gelfreikh, G., Urpo, S., Pohjolainen, S., Shibasaki, K., 2000, Astron. Atrophys. Suppl., 144, 169
 Gulyaev, R.A., 1992, Solar Phys., 142, 213
 Gulyaev, R.A., 1994, Astrphys. J., 437, 867

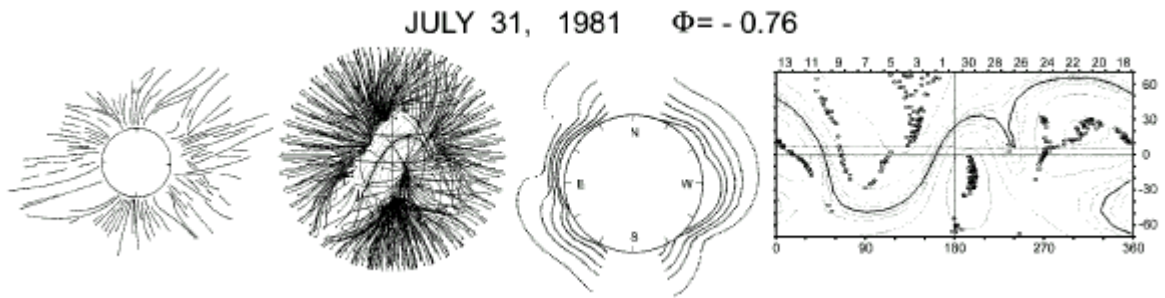
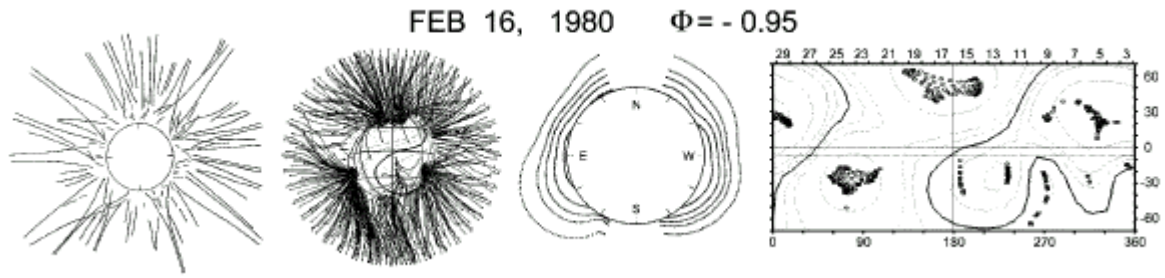
Gulyaev R.A., Vanyarkha, N.Ya., 1992, Solar Phys., 140, 369
 Hoeksema, J.T., 1991, 'Solar magnetic fields - 1985 through 1990', Report CSSA-ASTRO-91-01.
 Hoeksema, J.T., Scherrer, P.H., 1986, 'The Solar Magnetic Field - 1976 through 1985', WDCA Report UAG-94, NGDC, Boulder.
 Ivanov, K.G., Kharshiladze, A.P., 1994, Geomagn. Aeron., 34, 22
 Loucif, M.L.: 1988, in 'Solar and Stellar Coronal Structure and Dynamics', ed. R.C. Altrrock, Sunspot, NM, 406
 Loucif, M.L., Koutchmy, S., 1989, Astron. Astrophys. Suppl., 77, 45
 Ludendorff, H., 1928, Sitzber. Preuss. Akad. Wiss., 16, 185
 Mitchell, S.A., 1929, Handb. Aph., 4, 231
 Obridko, V.N., Shelting, B.D., 1999a, Solar Phys., 184, 187
 Obridko, V.N., Shelting, B.D., 1999b, Solar Phys., 187, 185
 Sýkora, J., Ambrož, P., 1995, Zborník z 12. celoštátneho slnečného seminára, SúH, Hurbanovo, 73
 Sýkora, J., Badalyan, O.G., 1992, in 'Coronal Streamers and Coronal Loops and Solar Wind Composition', ed. C. Mattok, ESA, SP-348, 137
 Sýkora, J., Badalyan, O.G., Obridko, V.N., 2002, Adv. Space Res., 29, 395
 Sýkora, J., Ambrož, P., Minarovjeh, M., Obridko, V.N., Pintér, T., Rybanský, M., 1998, in 'Solar Jets and Coronal Plumes', ed. Tan-Duc Guyenne, ESA, SP-421, 79
 Sýkora, J., Badalyan, O.G., Obridko, V.N., Pintér, T., 1999, Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso, 29, 89
 Vasilieva, V.V., Tlatov, A.G., 2002, private communication.
 Vsekhsvyatsky, S.K., Nikolsky, G.M., Ivanchuk, V.I., Nesmyanovich, I.A., Ponomarev, E.A., Rubo, G.A., Cherednichenko, V.I., 1965, in 'Solar Corona and Corpuscular Emission in the Interplanetary Space', ed. S.K. Vsekhsvyatsky, Kiev University Publ. House, Kiev, 73 (in Russian)
 Wang, Y.-M., Howley, S.H., Sheeley, N.R., Jr., 1996, Science, 271, 417
 Wang, Y.-M., Sheeley, N.R., Jr., Rich, N.B., 2000, J. Geophys. Res. Lett., 27, 149

Tabuľka 1. Zoznam pozorovaných zatmení (1973-1999)

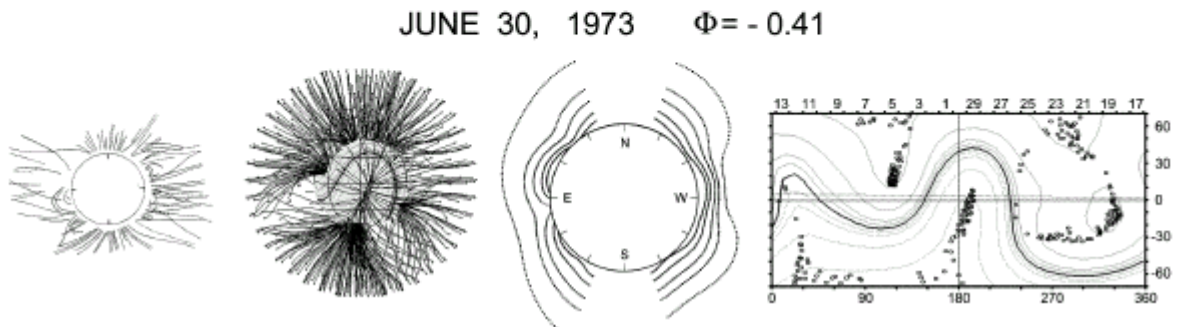
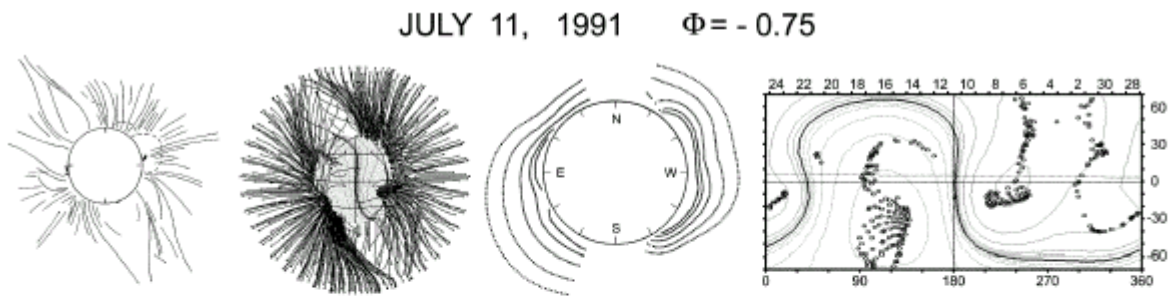
Č.	Dátum	Miesto	Fáza cyklu	Sploštenie
1	1973 (30. jún)	El Meki, Rep. Niger	-0.41	0.239
2	1980 (16. február)	Jawalagera, India	-0.95	0.016
3	1981 (31. júl)	Tarma (Bratsk), ZSSR	-0.76	0.187
4	1983 (11. jún)	Cepù, Indonézia	-0.39	0.251
5	1991 (11. júl)	La Paz, Mexiko	-0.75	0.002
6	1994 (3. november)	Criciúma, Brazília	-0.33	0.142
7	1995 (24. október)	Nakhon Sawan, Thajsko	-0.16	0.159
8	1997 (9. marec)	Pervomajskij, Rusko	+0.14	0.207
9	1998 (26. február)	Gros Cap, Gaudeloupe	+0.41	0.215
10	1999 (11. august)	Tihany, Maďarsko	+0.82	0.037



Obrázok 1. Polohy nami pozorovaných zatmení na krivke Wolfových čísiel slnečných škvŕn. Vyznačené sú čísla slnečných cyklov.

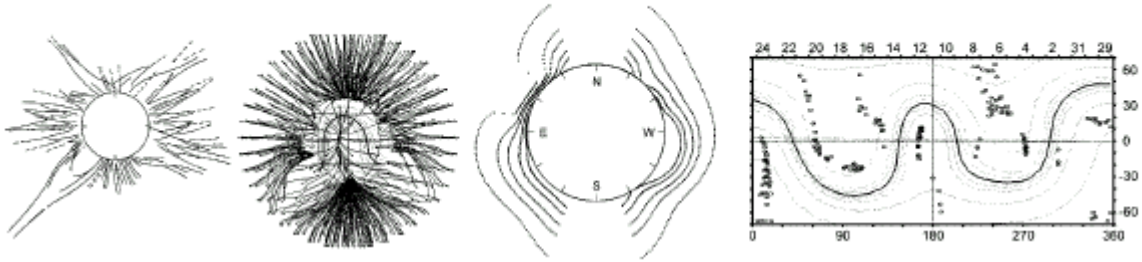


Obrázok 2. Vid' text za poslednou časťou tohoto obrázka.

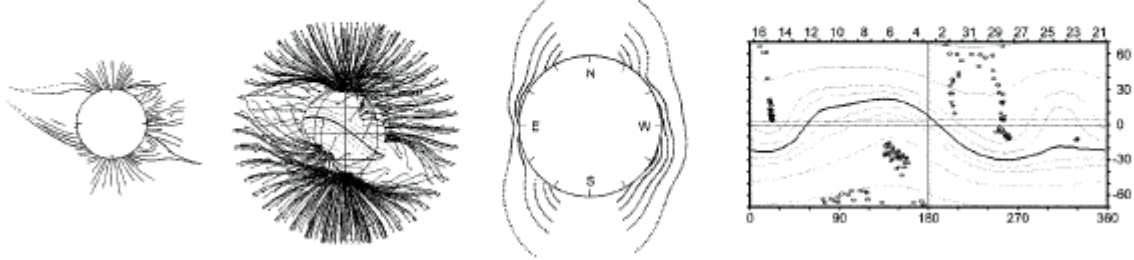


Obrázok 2. Vid' text za poslednou časťou tohoto obrázka.

JUNE 11, 1983 $\Phi = -0.39$

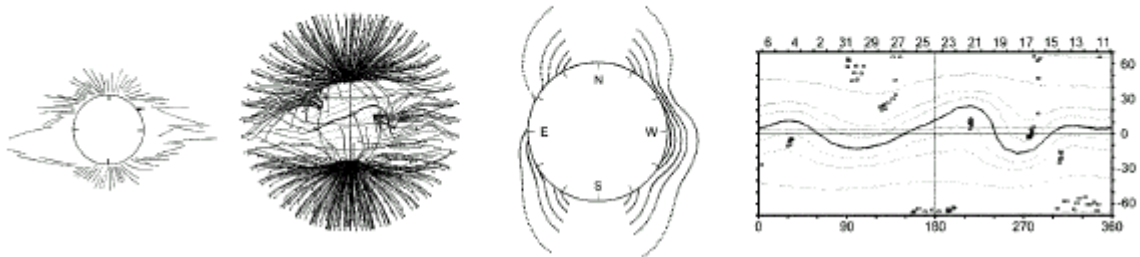


NOV 3, 1994 $\Phi = -0.33$

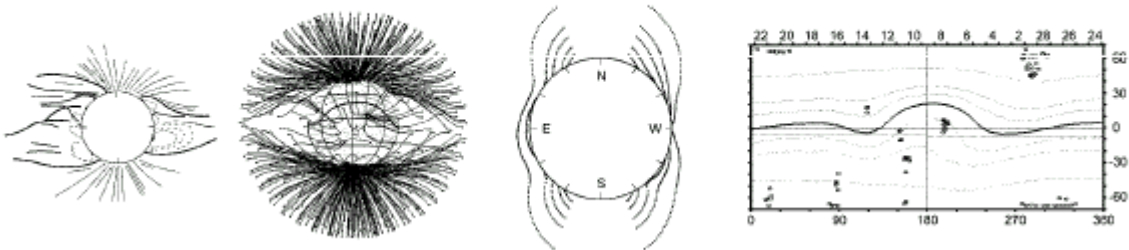


Obrázok 2. Vid' text za poslednou časťou tohoto obrázka.

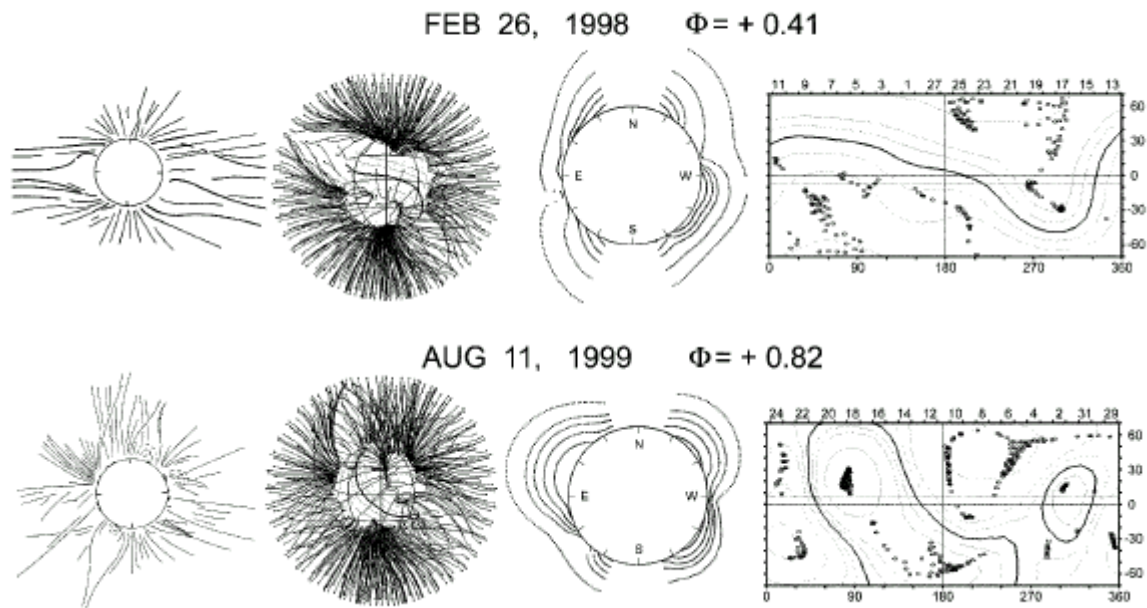
OCT 24, 1995 $\Phi = -0.16$



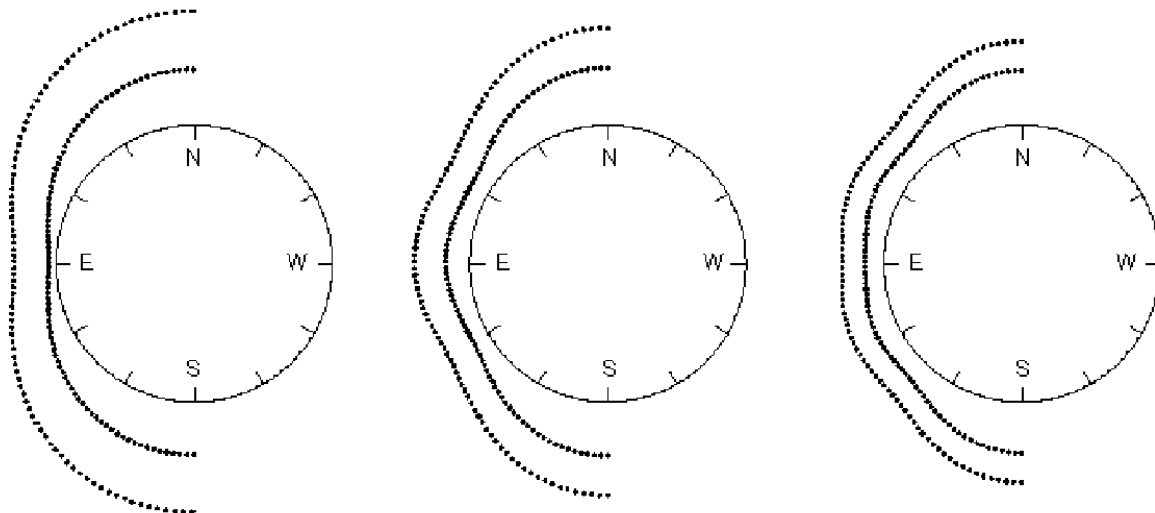
MARCH 9, 1997 $\Phi = +0.14$



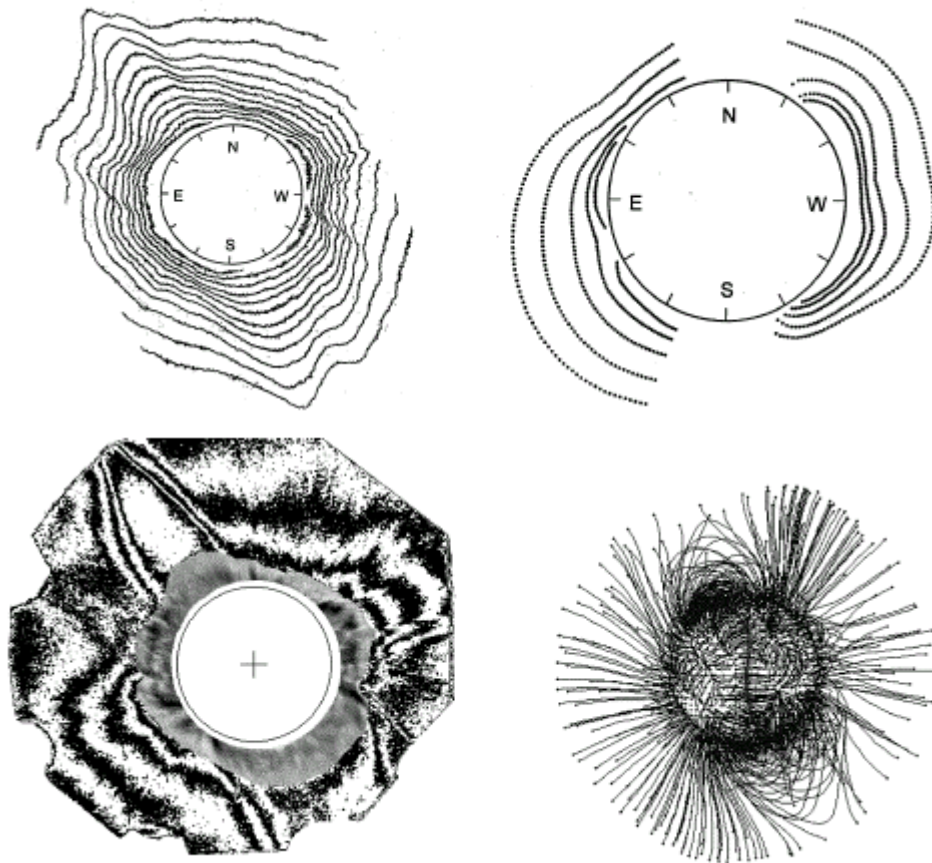
Obrázok 2. Vid' text za poslednou časťou tohoto obrázka.



Obrázok 2. Porovnanie pozorovaných globálnych tvarov zatmeňovej bielej koróny s topológiou koronálneho MP. štyri stĺpce na tomto obrázku predstavujú (zľava do prava): kresby štruktúry bielej koróny; vypočítanú topológiu otvorených siločiar koronálneho MP; izočiare intenzity MP (izogaussy); a synoptické mapy radiálnej zložky intenzity MP s ukotveniami otvorených siločiar vo fotosfére (otvorené krúžky). Héliografické dĺžky 90° a 270° predstavujú východný a západný okraj Slnka v deň zatmenia. Uvádžame aj dátumy zatmení a príslušnú fázu cyklu v týchto dňoch. Zatmenia sú usporiadané podľa ich narastajúcej fázy.



Obrázok 3. Isočiare intenzity MP vypočítané pre dipól, kvadrupól a oktupól (zľava do prava) za predpokladu magnetického momentu rovného $50 \mu T$.



Obrázok 4. Na horných paneloch sú sústava izofot (vľavo) a izogauss (vpravo), na dolných paneloch sú koronálne štruktúry (vľavo) a štruktúry uzatvorených siločiar koronálneho MP (vpravo), všetko odvodené pre zatmeňovú korónu 11. júla 1991. Stredná a vonkajšia koróna je reprezentovaná polarizačnou mapou odvodenou z polarizačných snímok bielej koróny, zatiaľčo štruktúra vnútornej koróny (vsunutá vnútorná poltónová časť) je reprezentovaná počítačovo spracovaným snímkom v zelenej koronálnej čiare (detailne vid' v texte).