

# Příspěvek k numerické extrapolaci koronálních magnetických polí

*P. Ambrož, Astronomický ústav AVČR, Ondřejov, pambroz @asu.cas.cz*

*M. Bělik a E. Marková, Hvězdárna Úpice, belik @obsupice.cz, markova @obsupice.cz*

## Abstrakt

Pokročilé numerické metody zpracování obrazu umožňují zásadním způsobem manipulovat s kontrastem snímků a tedy i zvýraznit jemné struktury ve sluneční koróně. Získané struktury jsou superpozicí různých koronálních struktur promítajících se do pozorovací roviny, které však mohou být identifikovány pomocí vypočtených magnetických struktur. Použili jsme nový přístup k aplikaci metody numerické extrapolace koronálních magnetických polí. Identifikaci magnetických struktur je demonstrována na mnoha oblastech kolem slunečního okraje. Touto cestou lze spolehlivě identifikovat příspěvky od jednotlivých magnetických oblastí a specifikovat původ a tvar 3D struktur ve sluneční fotosféře, chromosféře a koróně. Postup názorně dokumentuje prostorovou kompozici koronálních struktur.

## 1. ÚVOD

Struktura sluneční bílé koróny zpravidla představuje hlavní předmět zájmu mnoha expedic za úplným zatměním Slunce. Dosavadní výsledky expedic z domova i z ciziny ukazují, že prostorové rozlišení pozorování celé koróny především s nástupem elektronických detektorů obrazu za posledních deset let výrazně vzrostlo a navíc se podařilo vyvinout numerické metody zpracování obrazu, které především sofistikovanou manipulací s kontrastem jednotlivých snímků ukazují množství detailů, strukturálních útvarů a velkorozměrových koronálních útvarů, u nichž si klademe otázku co je příčinou jejich vzniku. Vedle toho ovšem je dnes již všeobecně známo a akceptováno, že za tvorbu výrazně strukturovaných útvarů ve sluneční koróně je zodpovědné koronální magnetické pole, které svým tvarem a strukturou formuje koronální plazma do těch útvarů, které potom z pozorování během několika minut totality odhalujeme.

Fyzikálně vzato, předpokládáme, že magnetické pole v koróně je v základě odvozeno od magnetického pole ve sluneční fotosféře. V koronálním prostoru se podílí na uspořádání hustotních a tlakových poměrů do té

míry, že v některých oblastech dochází k nárůstu koncentrace koronálního plazmatu a potom v důsledku expanzního procesu, který vyplývá z vysoké teploty koróny dochází k transportu částic plazmatu směrem od Slunce do meziplanetárního prostoru. Střední rychlost expanze potom způsobuje, že všechny plazmové elektricky vodivé struktury v koróně mají tendenci být spolu s koronálním magnetickým polem „vytahovány“ od středu Slunce v radiálním směru, takže v určité vzdálenosti od slunečního okraje se směr útvarů ve strukturách stává striktně radiální. Model takového uspořádání magnetického pole, plazmatu a jeho rychlostí je trojrozměrný MHD model a byl již realizován, avšak výpočetní náročnost zatím nedoznala jeho běžného využití. Před zatměním v březnu 2006 v Africe a Asii byly zpracovány modelové předpovědi na základě magnetických měření z poslední otočky před zatměním a lze konstatovat, že základní struktury v koróně byly předpovězeny velmi dobře. Model ale zcela obecně zatím nebyl příliš využit pro potřeby analýzy koronálních útvarů a především nám není známo, že by poskytl detailní informace o jednotlivých koronálních útvarech.

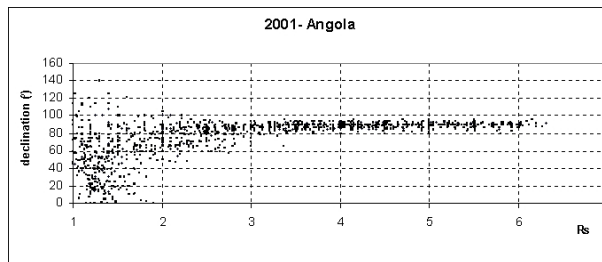
## 2. MODEL A METODIKA VÝPOČTU

Mnohem jednodušší verze, která je vybudována na řešení t. zv. okrajové úlohy ve sférické koronální slupce, staví na numerické extrapolaci měřených fotosférických polí na vnitřní hranici slupky a na skutečnosti, že v určité vzdálenosti od středu Slunce je přítomna jen radiální složka magnetického pole. Tam kde podmínka radiálnosti je v nejbližší vzdálenosti od středu splněna se umísťuje vnější hranice slupky. Magnetické pole je potom vypočítáváno v jednotlivých bodech uvnitř slupky podle analyticky odvozených vzorců a závisí jak na naměřených hodnotách ve fotosféře, tak na poloměru vnější hranice, které se obvykle říká „zdrojová plocha“. Charakter pole uvnitř sférické slupky lze dále ještě ovlivnit jak nastavením hypotetické horizontální proudové hustoty ve fotosféře, která ovlivňuje radiální orientaci magnetického vektoru v těsném okolí fotosféry a potom ještě umělým zavedení elektrických proudů podél jednotlivých siločar – HCSS model (Zhao a Hoeksema, 1993), čímž lze získat vedle bezproudových konfigurací i konfigurace bezsilové, ovšem pouze s konstantním transportem magnetické helicity, kdy odchylka od bezproudového stavu lineárně závisí na jediném volném parametru, konstantním pro všechny body v koronálním prostoru. Je nesporné, že posledně zmiňovaná verze má k dispozici alespoň tři volné parametry, což snižuje její fyzikální významnost, avšak je poměrně rychlá, dovoluje dostatečně vysoké prostorové rozlišení a v našich podmínkách je poměrně snadno realizovatelná.

## 3. POZOROVACÍ MATERIÁL

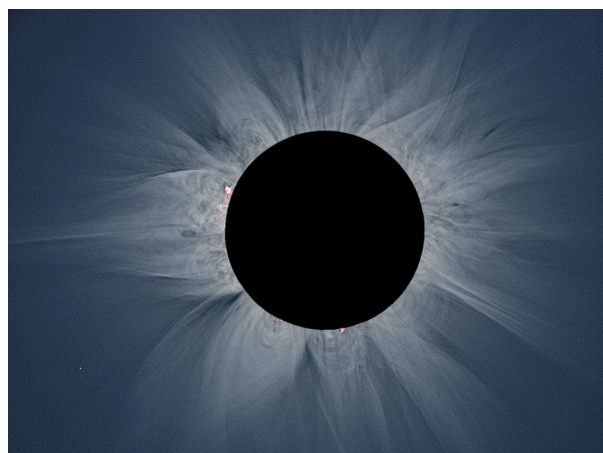
Cílem této studie je využít velmi kvalitních snímků bílé koróny, pořízené během expedice do Angoly při zatmění dne 21. 6. 2001 (Bělik a kol., 2003) s následně numericky zvýrazněnými detailními strukturami pro nastavení takových volných parametrů v modelu, aby byl získán maximální souhlas modelu s pozorováním. Kromě toho jde o zjištění v jakých magnetických podmínkách ve fotosféře jednotlivé koronální útvary jsou zakotveny a zda existuje vzájemná interakce mezi tvarem a rozměry jednotlivých sousedních koronálních útvarů, včetně přítomnosti koronálních děr.

Nezbytné pro výpočet jsou hodnoty fotosférických magnetických polí. Metodika je zvolena tak, že využívá měření, pořizovaných systematicky na Wilcoxově sluneční observatoři Stanfordovy university v Kalifornii. Rozložení pole ve fotosféře je popsáno souborem tzv. sférických harmonických funkcí, jejichž hodnoty jsou odvozeny přímo z pozorování. Maximální stupeň těchto koeficientů v našem případě je charakterizován hodnotou  $\ell = 19$ .

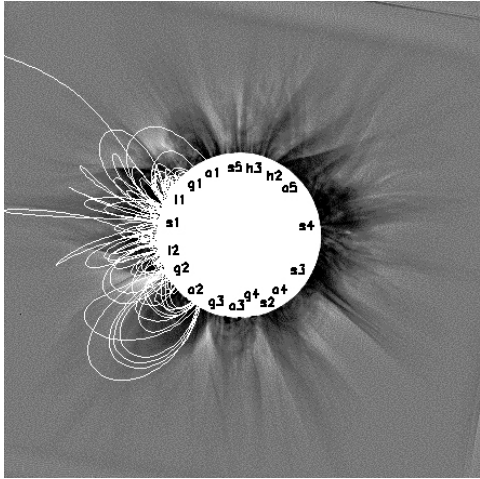


**Obr. 1.** Odklon vláken a trubic ve zřetelných koronálních strukturách od radiálního směru v závislosti na výšce nad okrajem pro zatmění z roku 2001. Graf ukazuje, že obvykle užívaný poloměr zdrojové plochy  $2,5 R_o$  není použitelný pro toto zatmění. O radiálním směru ve strukturách lze hovořit od výšky  $3,2 R_o$  a podmínka radiálnosti je dobře splněna po dosažení vzdálenosti  $4,5 R_o$ .

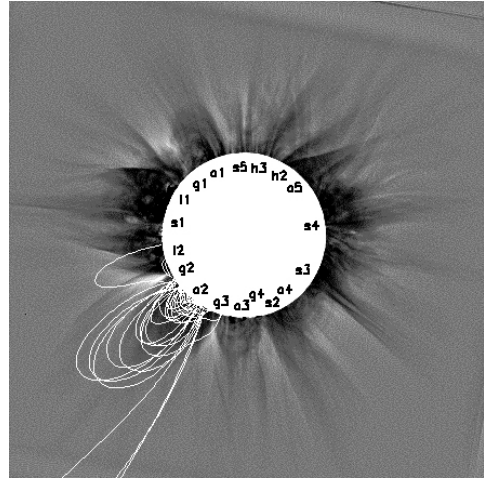
Dalším důležitým údajem je poloměr zdrojové plochy. V literatuře se často uvádí hodnota  $R_{ss} = 2.5 R_o$ , avšak to je hodnota evidentně nízká, poněvadž hranice, za níž se vyskytují čistě radiální struktury je mnohem výše. Ke stanovení  $R_{ss}$  bylo využito kvalitních snímků ze zatmění a u všech zřetelně identifikovaných struktur byly měřeny odklony jejich vláken, trubic či okrajů od radiálního směru. Je zřejmé že při okraji Slunce je rozptýl hodnot odklonu značný, avšak s narůstající výškou se zmenšuje až konečně se jeho hodnota blíží nule. Takových bodů samozřejmě s výškou ubývá, nicméně lze říci že z měření vyplývá hodnota  $R_{ss} = 4 - 4.3 R_o$ . Podle naší analýzy se hodnota poloměru, pro něž je výše uvedená podmínka splněna, mění patrně i v rámci cyklu aktivity, poněvadž pro jednotlivá zatmění je různá.



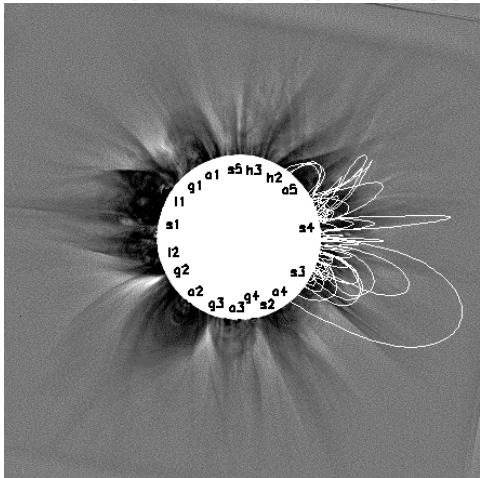
**Obr. 2.** Vynikající kompozice celé série snímků, pořízených během zatmění 21. 6. 2001 v Angole a následně numericky zpracovaných M. Druckmüllerem.



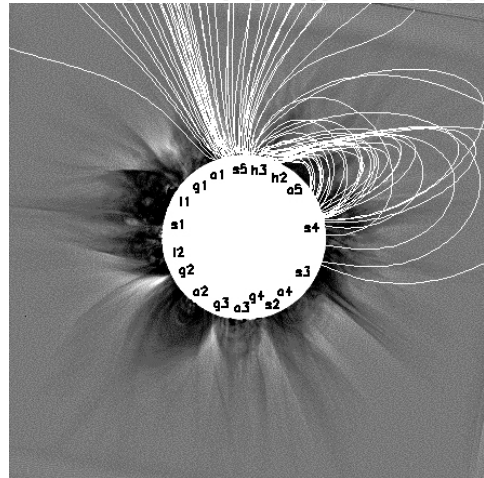
*Obr. 3a.  $P[40,120],S[5,55][40,-30],H[3]$*



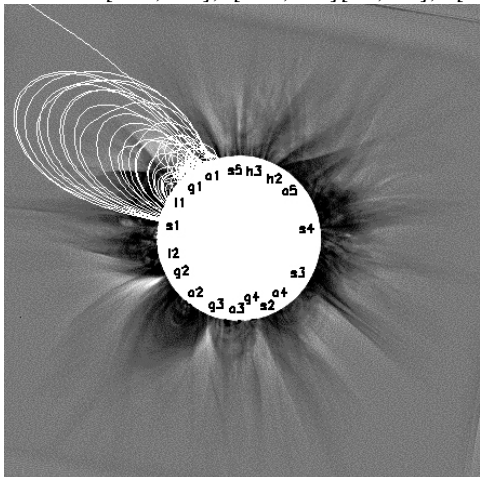
*Obr. 3d.  $P[115,165],S[0,35][-30,-62],H[3]$*



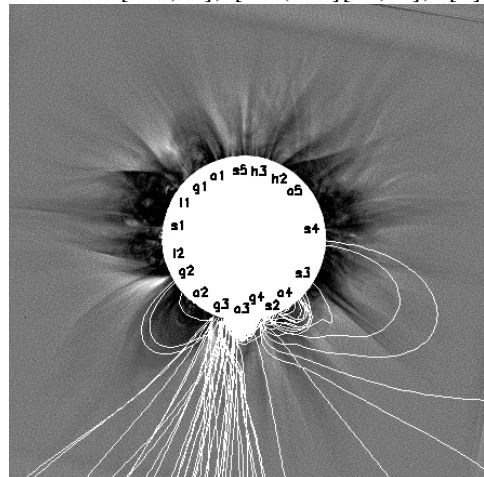
*Obr. 3b.  $P[225,330],S[180,210][30,-25],H[3]$*



*Obr. 3e.  $P[275,10],S[210,360][88,70],H[2]$*

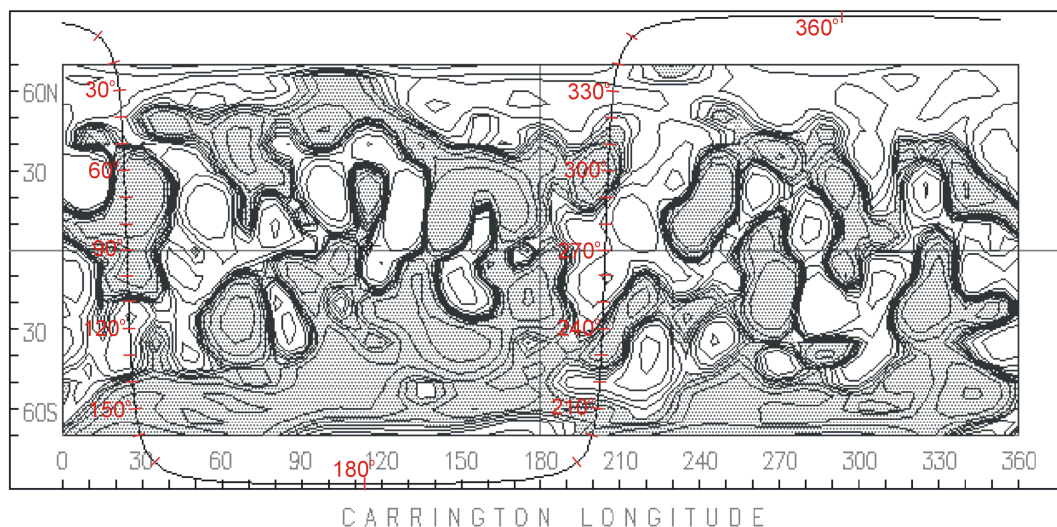


*Obr. 3c.  $P[15,80],S[5,80][40,70],H[3]$*



*Obr. 3f.  $P[120,220],S[10,220][-65,-5],H[3]$*

**Obr. 3.** (na předchozí straně) Soubor obrázků, reprezentující překrytí extrapolovaných magnetických siločar (bílé čáry) přes struktury bílé koróny, které jsou na všech snímcích identické. Pod každým obrázkem je uveden interval pozičních úhlů kde jsou vypočtené siločáry na okraji Slunce  $P$  [dolní, horní], dále oblast, v níž jsou počítány siločáry v heliografických souřadnicích, ohraničených heliografickými souřadnicemi  $S$  [délka-min, délka-max][šířka-max, šířka-min] a parametr, charakterizující horizontální proudovou hustotu  $H$  [od 2 do 3].



**Obr. 4.** Synoptická mapa fotosférického magnetického pole pro CR1977 odvozená ze sférických harmonických koeficientů z WSO Stanfordské university s maximálním hlavním číslem koeficientů  $\ell=19$ . Spojitá čára představuje polohu slunečního okraje v okamžiku úplného zatmění se souřadnicemi středu disku  $L_0 = 114.2^\circ$  a  $B_0 = 1.8^\circ$ .

#### 4. SROVNÁNÍ MODELU S POZOROVÁNÍM

Podkladem každého obrázku je identická upravená fotografie koronálních struktur, Uvnitř slunečního disku jsou označeny písmeny typické struktury, pozorované v koróně (arkády **a**, deprese jasu koróny **g**, smyčky **l**, přilbicovité útvary **h** a koronální paprsky **s**).

Struktury siločar na obr. 3a a 3b jsou extrapolovány z bipolárních oblastí na obou stranách od rovníku, kde magnetický tok je rozptýlen mezi řadu individuálních ostrůvků. Hlavní orientace neutrální čáry je v meridionálním směru. Ve vnitřní koróně lze najít mnoho smyčkovitých útvarů, avšak jejich jemná struktura není z pozorování příliš zřejmá. Siločáry souhlasí se smyčkami **l1** a **l2**. Paprsek **s1** je tvořený velkou smyčkou s rovinou orientovanou rovnoběžně s pozorovacím paprskem. Podobná projekce smyčky do téměř radiálního paprsku je také v případě **s4**. Arkády **a2** a **a5** souhlasí velmi dobře s neutrálními čarami protínajícími sluneční okraj na šířkách  $S37^\circ$  a  $N43^\circ$

Jasové deprese **g2**, **g3** a **g4** dobře souhlasí s otevřenými konfiguracemi v jedné oblasti stejné polarity. V těchto depresích je snížený jas způsoben nejspíše nízkou hustotou koronálního plazmatu a patrně představují boční pohled do koronální díry. Model není schopen znázornit hranice přilbicovitých struktur ve střední a vnější koróně na pozičních úhlech od  $50^\circ$  do  $105^\circ$ .

Systém arkád **a1** ve vnitřní koróně na obrázku 3c je spojen se siločarami ze složité struktury neutrální čáry poblíž okraje na šířkách  $N40^\circ$ - $N50^\circ$ . Vysoké smyčky z výpočtu nemohou být nalezeny na snímku koróny,

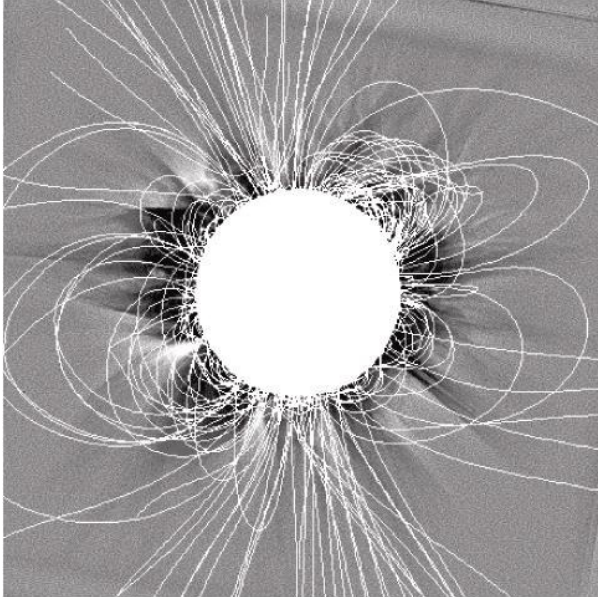
poněvadž model patrně do tak velikých vzdáleností již vždy dobře neplatí. Podobná situace je na západním okraji na obr. 3e, kde arkády **a5** (ne příliš zřetelné v koróně) jsou výborně modelovány siločarami. Velmi dobře model souhlasí také v případě skloněného systému přilbicovitého útvaru **h2**, velmi velká smyčka sleduje paprskovitou strukturu **s4** pouze ve vnitřní koróně, avšak podstatný nesouhlas pozorujeme ve vnější koróně. Mnohé téměř radiální polární paprsky modelované na obr. 3e souhlasí velmi dobře s otevřenými siločarami, počítanými modelem.

Oblouky a paprsky na jižní polokouli jsou modelovány na obrázcích 3d a 3f, kde siločáry pro **a2**, **a3** a **a4** souhlasí velmi dobře s pozorováním. Paprsky **s2** a **s3** ale nenacházejí v našem modelu dostatečnou podporu. Paprsek **s3** je přísně radiální a proto je nejspíše horní částí přilbicovitého útvaru, zakotveného ve fotosféře na odvrácené straně Slunce, nejspíše v oblasti s hranicemi na heliografických souřadnicích  $S[140^\circ, 165^\circ]$ ,  $[35^\circ, 15^\circ]$ , která je minimálně  $50^\circ$  za okrajem.

#### 5. DISKUSE A ZÁVĚR

Obecně lze konstatovat, že při vhodné volbě volných parametrů v modelu extrapolace fotosférických magnetických polí se podařilo velmi uspokojivě popsat pozorované koronální struktury vypočtenými magnetickými siločarami, což potvrzuje představu, že pro formování koronálních struktur je přítomnost magnetického pole rozhodující. Ukazuje se, že při stávajícím dostupném rozlišení koronálních struktur je souhlas velmi uspokojivý již při použití tzv. bezproudové aproximace modelu a je velmi obtížné

stanovit, že by např. model lineárního bezsilového magnetického pole souhlas zlepšil. Z toho důvodu je bezproudový model typu HCSS se zdrojovou plochou na  $R_{ss} = 4 - 4.5 R_o$  a parametrem proudové hustoty  $a = 3$  pro Carringtonovu otočku CR1977 se sférickými harmonickými koeficienty s maximálním hlavním číslem  $\ell = 19$  velmi dobrou aproximací přítomného magnetického pole ve sluneční koróně.



**Obr. 5** Extrapolovaná struktura magnetického pole v koróně, počítaná podle HCSS modelu pro úplné zatmění Slunce z 21. 6. 2001 v Angole. Užitý poloměr zdrojové plochy je  $4.5 R_o$ , a parametr horizontální proudové hustoty je  $a=3$ . Maximální hlavní index sférických harmonických koeficientů je  $\ell=19$ . Koronální struktury koincidují s modelem v dolní a střední koróně, nevystihují ale jasové a hustotní poměry, nýbrž znázorňují především magnetickou kostru koróny jako celku.

Bude patrně vhodné podobnou metodikou porovnat model s pozorováním i pro pozorování struktury koróny během ostatních zatmění, pro něž jsou magnetická data k dispozici a sledovat, zda se odvozené parametry modelu mění a pokud ano, zda v tom existuje nějaký vztah např. k fázi cyklu sluneční činnosti.

#### **Poděkování**

Autoři děkují M. Druckmüllerovi za laskavé zpracování fotografických snímků koróny ze zatmění v roce 2001 v Angole. Studie byla zpracována s podporou grantu GA/AVČR A300030506.

#### **LITERATURA**

- Bělik, M., Druckmüller, M., Marková, E., Křivský, L.: 2003, in Proc. International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium 2003 "Solar Variability as an Input to the Earth's Environment", Tatranská Lomnica, Slovak Republic, June 23 - 28, 2003, ESA SP-535, A Wilson (ed.), September 2003, p. 741
- Zhao, X. P. and Hoeksema, J. T.: 1993, Solar Phys. **143**, 41.