

Extrapolácia a geometrické vlastnosti magnetického poľa aktívnych oblastí

Mgr. Jaroslav Dudík, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK v Bratislave,
dudik @fmph.uniba.sk

Doc. RNDr. Elena Dzifčáková, CSc., Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK
v Bratislave, dzifcakova @fmph.uniba.sk

Abstrakt

Magnetické pole hrá dominantnú úlohu pri rovnováhe síl pôsobiacich na plazmu slnečnej koróny. Fyzikálne podmienky v koróne sú také, že elektrické prúdy v plazme tečú iba pozdĺž siločiar magnetického poľa takže na plazmu nepôsobí Lorentzova sila. Podmienka "bezsilovosti" predstavuje dobrú, matematicky jednoducho vyjadriteľnú aproximáciu skutočných podmienok v slnečnej koróne. Použitím meraní magnetického poľa aktívnej oblasti v slnečnej fotosfére ako okrajovej podmienky sme, za istých zjednodušujúcich predpokladov, následne schopní vypočítať magnetické pole v slnečnej koróne nad touto aktívnou oblasťou. Analýzou geometrických vlastností vypočítaného magnetického poľa je možné nájsť preferované miesta výskytu slnečných erupcií.

1. ÚVOD

Magnetické polia sú významným fyzikálnym faktorom pre veľké množstvo dejov odohrávajúcich sa v slnečnej atmosfére. Manifestácie magnetických polí možno pozorovať ako prejavy slnečnej aktivity. Ich väčšie koncentrácie spôsobujú vznik aktívnych oblastí, ktoré môžeme pozorovať napr. ako slnečné škvrny alebo zhluky koronálnych slučiek. Dynamika magnetických polí súvisí so slnečnými erupciami.

Je známe, že vyššie vrstvy slnečnej atmosféry, slnečná chromosféra a slnečná koróna, tvorí plazma s teplotami $10^4 - 10^7$ K. V dôsledku vysokých teplôt je koronálna plazma plne ionizovaná a má vysokú elektrickú vodivosť. V jej dôsledku a veľkej dĺžkovej škály je magnetické pole „vmrznuté“ do plazmy a akýkoľvek pohyb siločiar magnetického poľa je previazaný s pohybom plazmy. V koróne aktívnych oblastí je navyše tlak magnetického poľa zvyčajne oveľa vyšší ako tlak plazmy. Magnetické pole sa v takomto prípade stáva dominantným pri určovaní silovej rovnováhy v plazme a spôsobuje silnú anizotropiu veličín opisujúcich koronálnu plazmu (hustota, teplota, ionizácia a tepelná vodivosť). Tieto veličiny potom silne závisia na magnetickom poli, menia sa inak v smere pozdĺž magnetického poľa a inak v smere priečnom na magnetické pole.

V súčasnej dobe stále neexistujú metódy merania magnetického poľa s dostatočnou presnosťou

v ľubovoľnej výške v slnečnej koróne. Spoľahlivo merať magnetické pole je možné iba v slnečnej fotosfére. Pri fyzikálnom modelovaní koróny aktívnych oblastí sme preto odkázali na extrapoláciu magnetického poľa zo slnečnej fotosféry do koróny.

2. BEZSILOVÉ MAGNETICKÉ POLIA

V prípade magnetohydrostatickej rovnováhy, čo je stav, kedy sa v plazme nevyskytujú žiadne význačnejšie prúdenia, je rovnováha síl daná kompenzáciou Lorentzovej sily, gravitačnej sily a sily pochádzajúcej od gradientu tlaku. Ak však budeme predpokladať, že tlak plazmy je oveľa menší ako tlak magnetického poľa (čo je častý prípad v koróne aktívnych oblastí), a zameriame sa na oblasti slnečnej koróny, ktorých výškový rozsah je menší ako výšková tlaková škála, v rovnici rovnováhy síl je možné zanedbať príspevky od gravitačnej sily i gradientu tlaku. Aby bola rovnováha zachovaná, plazma sa musí usporiadať do stavu, v ktorom sa Lorentzova sila rovná nule. Túto podmienku je možné matematicky zapísať rovnicou

$$\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \mathbf{0}, \quad (2.1)$$

ktorá hovorí, že elektrický prúd \mathbf{j} tečie pozdĺž siločiar magnetického poľa \mathbf{B} . Aplikáciou Ampérovho zákona na

predchádzajúcu rovnicu dostaneme, že magnetické pole musí spĺňať podmienku

$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}. \quad (2.2)$$

Keďže Lorentzova sila sa v takomto prípade rovná nule, nazývame takéto magnetické pole bezsilové. Charakter bezsilového magnetického poľa je určený charakterom funkcie α , ktorej hodnota vo všeobecnom prípade závisí na priestorových súradniciach.

V prípade, že α je konštantná v celom priestore, nazývame prislúchajúce magnetické pole lineárnym bezsilovým magnetickým poľom.

3. EXTRAPOLÁCIA LINEÁRNYCH BEZSILOVÝCH POĽÍ

Pomocou rovnice (2.2) môžeme extrapolovať namerané magnetické pole aktívnej oblasti v slnečnej fotosfére do vyšších vrstiev slnečnej atmosféry, tj. slnečnej koróny. Výpočet magnetického poľa extrapoláciou má potom charakter riešenia diferenciálnej rovnice s okrajovou podmienkou. Výhodné je počítať magnetické pole vo vertikálne polonekonečnej oblasti priestoru, ktorej dolná podstava je daná dotyčnicovou plochou k slnečnej fotosfére v centre aktívnej oblasti. Ako okrajovú podmienku potom použijeme jednak namerané magnetické pole v slnečnej fotosfére (okrajová podmienka na dolnej podstave plochy ohraničujúcej polonekonečnú oblasť priestoru), jednak skutočnosť, že energia takto vypočítaného magnetického poľa musí byť v celom polpriestore nad aktívnou oblasťou konečná.

Riešenie takéhoto okrajového problému môžeme predpokladať napríklad v tvare Fourierovej transformácie, pričom podmienku konečnosti energie zohľadníme v predpokladanom exponenciálnom poklese jednotlivých zložiek magnetického poľa B_q ($q = x, y$ alebo z):

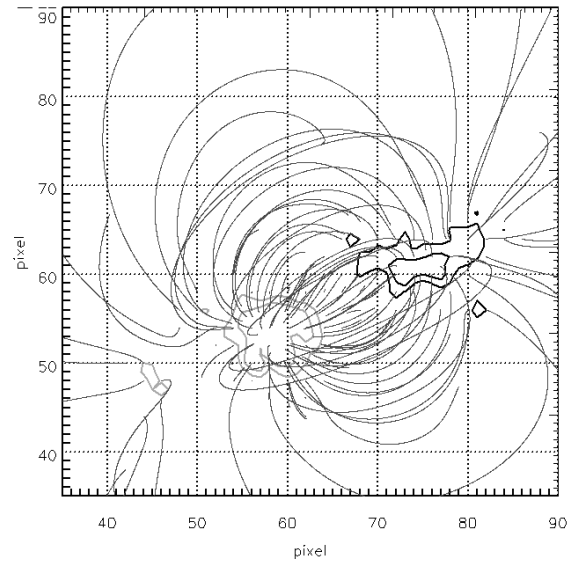
$$B_q(x, y, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} b_q^0(u, v) e^{-kz + 2\pi i u x + 2\pi i v y} du dv, \quad (3.1)$$

kde z je vertikálna komponenta karteziánskeho súradného systému nad slnečnou aktívnou oblasťou, u a v sú priestorové Fourierove frekvencie a k je vo všeobecnosti funkcia u, v a α . Ako okrajovú podmienku na dolnej podstave ohraničujúcej plochy postačí zobrať nameranú vertikálnu komponentu magnetického poľa v slnečnej fotosfére, ktorú je možno získať z fotosférického magnetogramu pozdĺžnej zložky magnetického poľa. Z tejto okrajovej podmienky priamo vyplýva vzťah

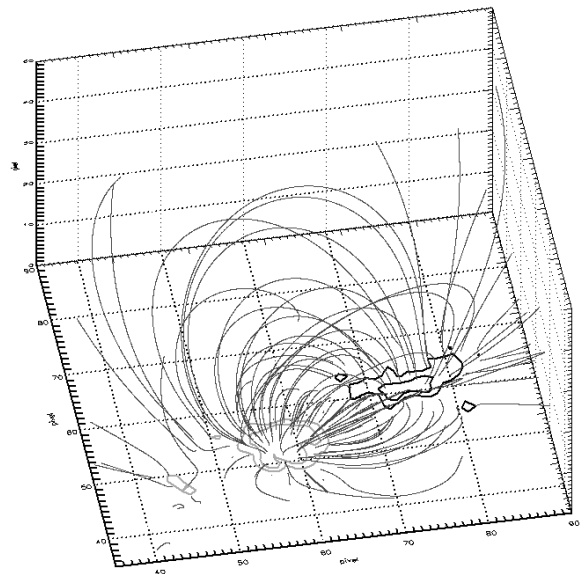
$$b_z^0(u, v) = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} B_z(x, y, z=0) e^{-2\pi i u x - 2\pi i v y} dx dy, \quad (3.2)$$

kde $(L_x \times L_y)$ je rozmer pozdĺžneho magnetogramu.

Takáto formulácia extrapolácie magnetického poľa pochádza od Alissandrakisa (1981) a bola detailne rozpracovaná v článku Garyho (1989).

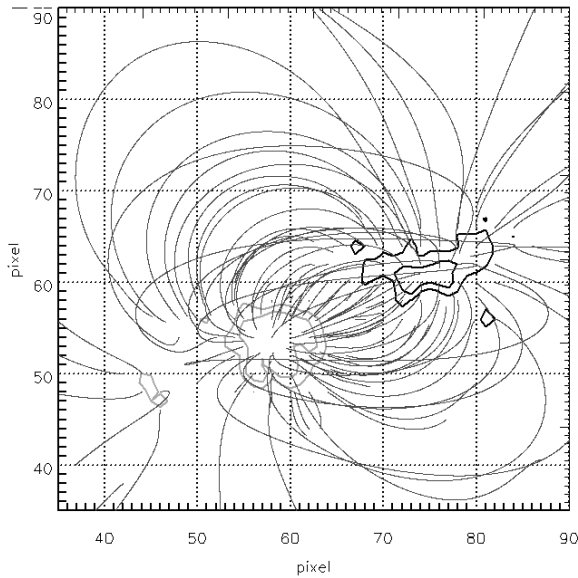


(a)

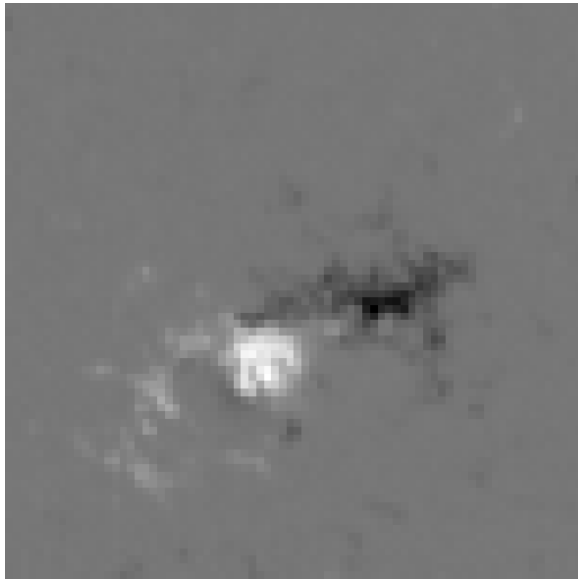


(b)

Obr. č. 1. Príklad extrapolovaného magnetického poľa metódou Fourierových transformácií. Potenciálové ($\alpha = 0$) magnetické pole aktívnej oblasti NOAA 8100 extrapolované z fotosférického magnetogramu pozdĺžnej zložky magnetického poľa pozorovaného prístrojom MDI na sonde SOHO dňa 31. 10. 1997 o 11:15 UT. (a) – pohľad zvrchu, (b) – pohľad z boku. Kontúry škvŕn kladnej, resp. zápornej polarít sú zobrazené bledosivou, resp. čiernou farbou.



Obrázok. 2. Príklad extrapolovaného magnetického poľa metódou Fourierových transformácií. Lineárne bezsilové ($\alpha = -3/128$) magnetické pole aktívnej oblasti NOAA 8100 extrapolované z fotosférického magnetogramu pozdĺžnej zložky magnetického poľa zo SOHO/MDI, 31. 10. 1997, 11:15 UT. Pohľad zvrchu.



Obrázok. 3. SOHO/MDI fotosférický longitudinálny magnetogram aktívnej oblasti NOAA 8100. Biela farba predstavuje kladnú polaritu, čierna farba zápornú polaritu.

4. GEOMETRICKÉ VLASTNOSTI MAGNETICKÝCH POLÍ AKTÍVNYCH OBLASTÍ

Predpokladajme, že poznáme magnetické pole aktívnej oblasti vo vertikálne polonekonečnom priestore nad časťou slnečnej fotosféry prislúchajúcej danej aktívnej oblasti. Predpokladajme ďalej, že celkový magnetický tok danej aktívnej oblasti je nulový, t.j. každá siločiara vychádzajúca z oblasti kladnej polarity v aktívnej oblasti sa vracia naspäť do tejto aktívnej oblasti v oblasti zápornej polarity.

Za účelom popisu geometrických a topologických vlastností magnetického poľa zavádzame pojem konektivity magnetických siločiar. Konektivita magnetických siločiar je zobrazenie, ktoré priradí polohu jedného ukotvenia (x, y) magnetickej siločiar (prípadne koronálnej slučky) v aktívnej oblasti polohu druhého ukotvenia (X, Y) . tejto siločiar. Takéto zobrazenie je bijektívne a obsahuje úplnú informáciu o konektivitě magnetických siločiar.

Vyšetrovaním toho, ako malá zmena polohy jedného ukotvenia siločiar ovplyvní zmenu polohy druhého ukotvenia siločiar možno nájsť miesta, kde sa konektivita siločiar veľmi mení (tzv. kváziseparatrixy) Pre tento účel je vhodné definovať tzv. tenzor gradientu konektivity D

$$D = \begin{pmatrix} \frac{\partial X}{\partial x} & \frac{\partial X}{\partial y} \\ \frac{\partial Y}{\partial x} & \frac{\partial Y}{\partial y} \end{pmatrix}, \quad \Delta = \det(D). \quad (4.1)$$

Matematicky definujeme kváziseparatrix pomocou tzv. faktora stlačenia Q definovaného vzťahom (Titov, Hornig a Démoulin, 2002):

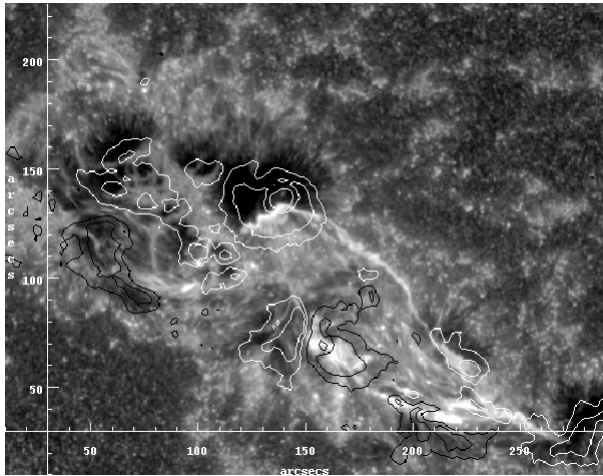
$$Q = \frac{N^2}{|\Delta|}, \quad (4.2)$$

kde N je norma konektivity siločiar definovaná vzťahom

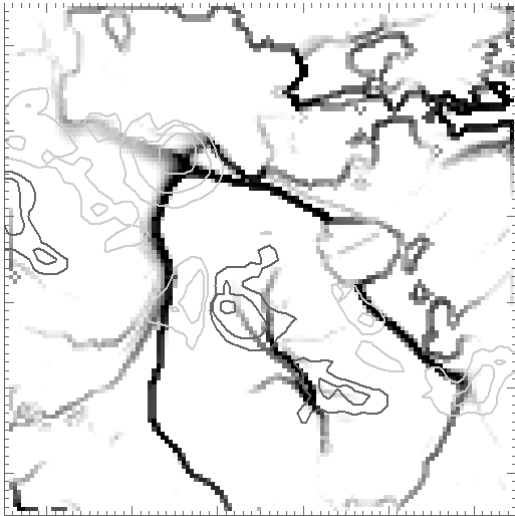
$$N = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial y}\right)^2}. \quad (4.3)$$

Kváziseparatrixom potom nazývame oblasť, kde Q je oveľa väčšie ako 2.

Démoulin *et al.* (1997) ukázali, že kváziseparatrixy sú preferovanými miestami výskytu erupčných jadier. Nájdením polôh kváziseparatrixov potom dostaneme miesta, v ktorých môžeme predpokladať výskyt erupčných jadier (obr. 4). Sledovaním časového vývoja konektivity zas môžeme nájsť zmeny v geometrii magnetického poľa napr. v dôsledku série erupcií.



(a)



(b)

Obrázok 4. (a) – zjasnenia (svetlé oblasti) v AR 9393 v kontinuu 160 nm zodpovedajúce erupcii pozorované družicou TRACE dňa 28. 3. 2001 o 12:51 UT, (b) – poloha kváziseparatrixov (čierne krivky) potenciálového modelu magnetického poľa vypočítaného extrapoláciou z pozdĺžneho SOHO/MDI magnetogramu zo dňa 28. 3. 2001 o 12:00 UT. Prebraté z Dudík (2005). Svetlosivé kontúry označujú kladnú polaritu magnetického poľa a tmavosivé zápornú polaritu.

v AR 8100 pre rozličné hodnoty parametra α . Zároveň boli určené polohy priesečníkov kváziseparatrixových plôch s fotosférou pre AR 9393 a tieto polohy boli porovnané s emisiou v kontinuu 160 nm, ktoré bolo pozorované družicou TRACE.

Pod'akovanie

Práca bola podporená VEGA grantom č. 1/2026/05.

LITERATÚRA

- Alissandrakis, C. E.: 1981, „On the computation of a Constant α Force-free Magnetic Field“, *Astron. Astrophys.*, 100, 197–200 (1981)
- Démoulin, P., Bagalá, L. G., Mandrini, C. H., Hénoux, J. C., Rovira, M. G.: 1997, „Quasi-separatrix layers in solar flares, II. Observed magnetic configurations“, *Astron. Astrophys.*, 325–317 (1997)
- Dudík, J.: 2005, „Extrapolácia slnečných magnetických polí z fotosféry do koróny metódou Fourierových transformácií“, Diplomová práca, 2005
- Gary, G. A.: 1989, „Linear force-free magnetic fields for solar extrapolation and interpretation“, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 69: 323–348, 1989
- Titov, V. S., Hornig, G., Démoulin, P.: 2002, „Theory of magnetic connectivity in the solar corona“, *J. Geophys. Res.*, 107, A8, 2002

ZÁVER

V článku sú popísané základné zjednodušujúce predpoklady a princípy metódy výpočtu magnetického poľa v slnečnej koróne. Zároveň sú v ňom vysvetlené niektoré z jeho základných topologických vlastností. Ako príklad bolo použité metódy extrapolácie pomocou Fourierových transformácií magnetického poľa fotosféry do slnečnej koróny vypočítané magnetické pole v koróne