

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



Projekčné efekty pri pozorovaní Slnka

Šimon Mackovjak



2008

Projekčné efekty pri pozorovaní Slnka

BAKALÁRSKA PRÁCA

Šimon Mackovjak

**UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY
KATEDRA ASTRONÓMIE, FYZIKY ZEME A METEOROLÓGIE**

Študijný odbor: 4.1.1 FYZIKA

Vedúci bakalárskej práce

Mgr. Jaroslav Dudík

BRATISLAVA 2008

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Čestne vyhlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce Mgr. Jaroslava Dudíka. A uviedol som všetku použitú literatúru.

.....

POĎAKOVANIE

Moje poďakovanie za veľkú ústretovosť, pomoc a trpezlivosť pri písaní tejto bakalárskej práce patrí vedúcemu práce Mgr. Jaroslavovi Dudíkovi. Poďakovanie patrí aj mojím rodičom, súrodencom a známym za ich podporu. A zároveň ďakujem za všetko Pánu Bohu.

ABSTRAKT

MACKOVJAK, Šimon: Projekčné efekty pri pozorovaní Slnka, Univerzita Komenského v Bratislave, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Katedra astronómie, fyziky zeme a meteorológie, Vedúci bakalárskej práce: Mgr. Jaroslav Dudík, Bratislava, 2008, 30 strán

Práca sa zaoberá základnými projekčnými efektmi pri pozorovaní Slnka. Dá sa rozdeliť do dvoch častí. V prvej časti sa nachádza stručný popis a charakteristika Slnka ako aj popis základných projekčných efektov, ktoré pri jeho pozorovaní vznikajú. Druhá časť je zameraná na elimináciu konkrétnych projekčných efektov vznikajúcich pri meraniach magnetického poľa pomocou vektorových magnetografov. Uvádza sa v nej spôsob deprojekcie magnetického poľa, odvodenie analytických transformačných vzťahov potrebných pre deprojekciu a popis vyvinutých programov, ktoré odvodené vzťahy implementujú. Príklad deprojekcie magnetického poľa je vykonaný na aktívnej oblasti NOAA 10484.

Kľúčové slová: projekčné efekty, aktívna oblasť, magnetogram, deprojekcia magnetického poľa

ABSTRACT

This work deals with projection effects appearing during solar observation. The document can be divided in the two parts. First part contains the short description and characteristics of the Sun, as well as main projection effects. In the second part we focus on elimination of projection effects from vector magnetograms. We derivate analytic transformation equations necessary for this elimination and also implement this equations in computer programs. We also perform application of these programs on active region NOAA 10484.

PREDHOVOR

Táto práca vznikla na podnet jej potrebnosti pre prax (redukcii pozorovaných dát) v odbore fyziky Slnka, taktiež z dôvodu nedostupnosti podobnej práce v domácej literatúre, resp. nie úplne jasným spracovaním tematiky v dostupnej svetovej literatúre. Cieľom práce bolo odvodiť analytické transformačné vzťahy medzi súradnicami na povrchu Slnka a súradnicami v pozorovaných dátach za účelom transformácie fotosférického magnetogramu. Bola vytvorená sada programov v prostredí IDL, pomocou ktorých sa deprojekcia fotosférického vektorového magnetogramu vykonáva.

OBSAH

ÚVOD	8
1 SLNKO – VŠEOBECNÁ CHARAKTERISTIKA	9
1.1 Poloha Slnka.....	9
1.3 Magnetické pole na Slnku.....	11
2 ZÁKLADNÉ PROJEKČNÉ EFEKTY	12
2.2 Okrajové stemnenie.....	13
2.3 Projekcia objektov v slnečnej atmosfére.....	14
2.4 STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory)	15
3 KOREKCIA VEKTOROVÝCH MAGNETOGRAMOV	16
3.1 Transformácia rovinných súradníc magnetogramu do heliografických súradníc	17
3.2 Transformácia magnetického poľa magnetogramu do deprojektovaného magnetického poľa	22
4 DEPROJEKCIA MAGNETICKÉHO POĽA AKTÍVNEJ OBLASTI NOAA 10484	24
4.1 Aktívna oblasť NOAA 10484 a použité dáta	24
4.2 Popis programového balíka	25
4.3 Výsledky	26
ZÁVER	29
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV.....	30

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 2.1 Okrajové stmernenie.....	13
Obrázok 3.1 Snímka Slnka v čiare H_{α}	17
Obrázok 3.2 Geometrická situácia pri pozorovaní Slnka.....	18
Obrázok 3.3 Transformácia karteziánskych súradníc do sférických	19
Obrázok 3.4 Transformácia medzi súrad. sústavou (x, y, z) a (x', y', z')	19
Obrázok 3.5 Transformácia medzi súrad. sústavou (x', y', z') a (x'', y'', z'')	20
Obrázok 3.6 Transformácia medzi súrad. sústavou (x'', y'', z'') a (X_1, Y_1, Z_1)	20
Obrázok 4.1 Aktívna oblasť NOAA 10484.....	24
Obrázok 4.2 Vektorový magnetogram aktívnej oblasti NOAA 10484.....	26
Obrázok 4.3 Vektorový magnetogram potenciálového mag. poľa.....	27
Obrázok 4.4 Porovnanie oblastí veľkého strihu na vekt. magnetograme.....	27

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha č. 1: Anaglyf slnečného disku
Príloha č. 2: MDI magnetogram slnečného disku
Príloha č. 3: <i>fi.pro</i>
Príloha č. 4: <i>potrou1.pro</i>
Príloha č. 5: <i>magnet.pro</i>
Príloha č. 6: <i>centrum.pro</i>
Príloha č. 7: <i>surad.pro</i>
Príloha č. 8: <i>pixel.pro</i>
Príloha č. 9: <i>m_gram.pro</i>

ÚVOD

Slnko predstavuje pre väčšinu ľudí objekt natoľko samozrejmy, že mu nevenujú veľa pozornosti. V minulosti si však ľudstvo jeho dôležitosť uvedomovalo oveľa viac, pretože poznali, že bez Slnka by život na Zemi nebol možný. Z fyzikálneho hľadiska je Slnko naozaj len jednou obyčajnou hviezdou zo stovky miliárd iných v našej galaxii. Avšak slnečným fyzikom je zrejmé, že bez pochopenia procesov na Slnku, porozumenie javov ovplyvňujúcich Zem a javov odohrávajúcich sa na iných hviezdach, nebude možné.

V prvej kapitole tejto práce je uvedená všeobecná charakteristika Slnka – poloha Slnka v Galaxii, jeho fyzikálne a chemické vlastnosti, ako aj magnetické pole. V druhej kapitole sú popísané základné projekčné efekty, ktoré vznikajú pri pozorovaní Slnka zo Zeme ako aj projekt dvojice sond STEREO, ktorý by mal týmto pre pozorovanie nepriaznivým efektom predchádzať. V tretej kapitole sa nachádza odvodenie analytických transformačných vzťahov potrebných pre vykonanie deprojekcie pozorovaného magnetického poľa. V poslednej, štvrtej kapitole je vykonaná aplikácia vzťahov z tretej kapitoly pomocou vytvoreného programového balíka na zvolenej aktívnej oblasti NOAA 10484.

Vykonanie deprojekcie magnetického poľa v slnečnej fotosfére sa ukazuje byť kľúčovou úlohou pri redukcii a vyhodnocovaní vektorových magnetogramov získaných z oblastí mimo centra slnečného disku.

1 SLNKO – VŠEOBECNÁ CHARAKTERISTIKA

1.1 Poloha Slnka

Slnko je jednou z približne 200 miliárd hviezd našej hviezdnej sústavy – Galaxie¹. Je vzdialené asi 28 000 svetelných rokov od jej stredu a asi 22 000 svetelných rokov od jej okraja. Nachádza sa na vnútornej strane špirálového ramena Orióna. Rýchlosť Slnka na jeho hviezdnej dráhe je 217 000 m/s.

Slnko je najbližšou hviezdou k našej planéte. Zem neobieha okolo neho po kružnici, ale po elipse s nízkou excentricitou ($e = 0,0167$). Slnko leží v jednom z ohnísk tejto elipsy. Zem je najbližšie k Slnku v perihéliu ($147,097 \cdot 10^9$ m) a najďalej v aféliu ($152,099 \cdot 10^9$ m). Ich stredná vzdialenosť je $149,599 \cdot 10^9$ m (1 AU).

1.2 Fyzikálne a chemické vlastnosti Slnka

Slnko obsahuje 99,86% všetkej hmoty Slnčnej sústavy. Jeho hmotnosť je $1,989 \cdot 10^{30}$ kg a polomer $6,955 \cdot 10^8$ m. Gravitačné zrýchlenie na povrchu Slnka dosahuje hodnotu $273,95 \text{ m/s}^2$.

Aj keď je Slnko najjasnejšou hviezdou na našej oblohe, rozmerom a žiarením patrí iba k „priemerným“ hviezdám. Jeho spektrálna trieda je G2V. G2 znamená, že má povrchovú teplotu približne 5780 K, čoho následkom je jeho viditeľná žltá farba. Rímska číslica V označuje, že Slnko patrí medzi hviezdy hlavnej postupnosti na Hertzsprung – Russellovom diagrame. Žiarivý výkon Slnka je $3,854 \cdot 10^{26}$ W a absolútna magnitúda je $4,83^{\text{mag}}$. Vizuálna magnitúda (pre vzdialenosť 1 AU) je $-26,74^{\text{mag}}$. Na oblohe môžeme Slnko pozorovať ako kotúč so zdanlivým uhlovým priemerom asi 0,5 oblúkového

¹ hodnoty fyzikálnych veličín v tejto kapitole sú získané z internetovej stránky <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>

stupňa (presnejšie 31' a 59,2" v čase strednej vzdialenosti od Zeme).

Skupenstvo Slnka je plazmatické; je tvorené vysoko ionizovanými horúcimi plynmi. Teplota v jeho strede dosahuje $1,4 \cdot 10^7$ K a centrálna hustota až $1,3 \cdot 10^5$ kg/m³. Takúto hustotu v strede Slnka zapríčiňuje tlak jeho horných vrstiev, ktorý v strede Slnka dosahuje hodnotu $4 \cdot 10^{16}$ Pa. Hustota ďalej od stredu klesá a v spodných častiach slnečnej atmosféry dosahuje už iba približne 1 kg/m³. Podobne klesá aj teplota a vo fotosfére dosahuje hodnotu 5780 K.

92,1 % Slnka tvorí vodík a 7,8 % hélium (ide o percentuálne zastúpenie počtu atómov). Zvyšná desatina percenta pripadá najmä na kyslík, uhlík a železo. Chemické zloženie Slnka sa určilo na základe pozorovania slnečného spektra. Dosiaľ sa v ňom identifikovalo asi 25 000 spektrálnych čiar v intervale vlnových dĺžok 293,5 – 877 nm. Vo viditeľnej oblasti sú najvýraznejšie čiary H α (656,3 nm) Balmerovej série vodíka, čiary D₁ a D₂ sodíkového dubletu (589,6 nm a 589,0 nm), čiary vápnika Ca II H a K (396,8 nm a 393,4 nm), a taktiež viac čiar neutrálneho železa (napr. 630,2 nm). V ultrafialovej časti spektra dominujú čiary ionizovaných kovov a Lymanova séria vodíka, v infračervenej časti spektra to je Paschenova séria vodíka. Tieto čiary umožňujú skúmať zloženie a fyzikálne vlastnosti slnečnej atmosféry. V kontinuu Slnko žiari aj v röntgenovej, gama a rádiovnej časti spektra.

Povrchové vrstvy Slnka nerotujú ako tuhé teleso. Na rovníku je rotačný pohyb najrýchlejší a na pólach najpomalší. Perióda rotácie klesá z 24,7 dňa na rovníku, na 28,2 dňa na 45° heliografickej šírky až na 34 dní v blízkosti pólův. Stredná doba rotácie zodpovedajúca 17° heliografickej šírky je 25,38 dňa a predstavuje siderickú dobu rotácie Slnka. Stredná doba rotácie pozorovaná zo Zeme, tzv. synodická doba rotácie Slnka, trvá približne 27,27 dňa. Slnečný rovník je voči ekliptike sklonený pod uhlom 7° 15'.

1.3 Magnetické pole na Slnku

Magnetické pole má pre väčšinu dejov v atmosfére Slnka kľúčovú úlohu. Jeho obvyklá hodnota je približne niekoľko desaťtisícin Tesla. Lokálne polia slnečných škvŕn (zvyčajne kruhovitých tmavých miest v slnečnej fotosfére s teplotou približne 4000 K, napr. obr. 4.1) dosahujú až 10^{-1} T. Keďže Slnko je magneticky premenná hviezda, polarita jeho poľa sa mení spolu s 11-ročným cyklom aktivity. Dynamiku magnetického poľa na Slnku popisuje niekoľko empirických modelov. Najznámejší z nich je Babcockov model (Babcock, 1961).

Magnetické polia sa často koncentrujú do lokálnych aktívnych oblastí. V týchto oblastiach sa výrazne prejavuje slnečná aktivita. Môžeme v nich pozorovať flokulové polia, v ktorých sa neskôr objavujú slnečné škvŕny, protuberancie, slnečné erupcie, koronálne kondenzácie (filamenty) a ďalšie prejavy slnečnej aktivity. Životnosť aktívnych oblastí je niekoľko hodín až niekoľko mesiacov, trvajú teda iba konečný čas a po určitom období zanikajú. Zvýšené ultrafialové a röntgenové žiarenie aj zvýšený tok častíc z aktívnych oblastí ovplyvňujú medziplanetárne prostredie i procesy v zemskej atmosfére.

Pre meranie magnetického poľa na Slnku sa využíva Zeemanov jav. Pre rozštep spektrálnych čiar ($\Delta\lambda$) platí nasledujúca závislosť (napr. Foukal, 1990):

$$\Delta\lambda \approx g_L \lambda^2 |\vec{B}| \quad (1.1)$$

kde g_L je Landého faktor súvisiaci s momentom hybnosti elektrónu, λ je vlnová dĺžka pôvodnej rozštiepenej čiary a $|\vec{B}|$ je intenzita magnetického poľa. Z veľkosti rozštepu a charakteru polarizácie spektrálnej čiary teda vieme určiť zložky indukcie magnetického poľa v danom mieste. Informácie o veľkosti a smere magnetického poľa sú zaznamenané na magnetograme. Vďaka tomu, že magnetické pole v slnečných škvŕnách je asi sto krát silnejšie ako magnetické pole v slnečnej atmosfére, vieme zmapovať magnetické pole fotosféry aj na základe rozštepu spektrálnych čiar s kratšími vlnovými dĺžkami teda aj z viditeľnej oblasti spektra. Takto získané magnetogramy sa nazývajú fotosférické magnetogramy.

2 ZÁKLADNÉ PROJEKČNÉ EFEKTY

Pri pozorovaní a vyhodnocovaní nameraných dát zo Slnka je veľmi dôležité brať ohľad na jeho sférický tvar. Je to spôsobené faktom, že na tu istú oblasť sa vplyvom slnečnej rotácie pozeráme pod neustále sa meniacim iným uhlom. Je teda rozdiel, či sa pozorovaná oblasť nachádza v centre alebo na okraji slnečného disku. Tento rozdiel je samozrejme spôsobený práve projekciou (premietnutím) priestorových objektov do roviny oblohy. No pamätať treba aj na skreslenie v dôsledku prítomnosti atmosféry Zeme. Zariadenie, ktoré v súčasnosti najviac eliminuje vplyv projekčných efektov ako aj vplyv atmosféry je dvojica sond STEREO.

2.1 Vplyv zemskej atmosféry – refrakcia

Pri pozorovaniach zo Zeme sa nikdy nevyhneme rušivým vplyvom atmosféry. Jedným z vplyvov atmosféry je refrakcia R . Môžeme ju definovať ako odchýlku svetelného lúča, spôsobenú lomom v zemskej atmosfére (napr. Bednář, 1989). Platí pre ňu nasledujúci vzťah:

$$R = k \operatorname{tg}(z') \quad (2.1)$$

kde k je refrakčná konštanta a z' je zdanlivá zenitová vzdialenosť objektu. Veľkosť refrakčnej konštanty závisí priamoúmerne na teplote, tlaku a vlhkosti vzduchu. Tento vzťah platí do $z' < 70^\circ$.

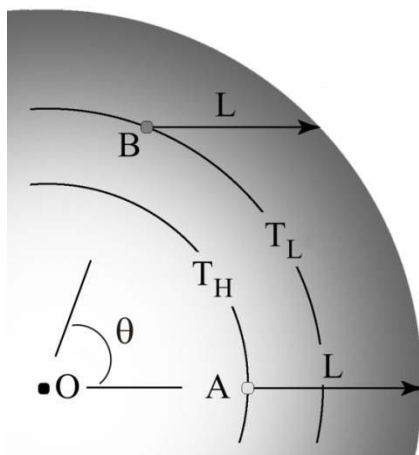
Refrakcia spôsobuje posunutie pozorovaného objektu do zdanlivej polohy smerom bližšie k zenitu. V blízkosti zemskeho povrchu sa svetelný lúč láme najviac. Zatiaľ čo vo výške 5° nad horizontom spôsobuje refrakcia posunutie obrazu o necelých $10'$, na horizonte je to už približne $34, 5'$. Pri pozorovaní východu alebo západu Slnka pozorujeme jav s názvom diferenciálna refrakcia, t.j. rozdielnu hodnotu refrakcie pre rôzne časti slnečného disku. Diferenciálna refrakcia spôsobuje výraznú deformáciu spodnej časti slnečného disku.

2.2 Okrajové stemnenie

Pri pozorovaní slnka je potrebná dbať na javy, ktorých charakteristika je rozdielna v strede a na okraji slnečného disku. Najlepšie viditeľný a ľahko pozorovateľný takýto jav (napr. na fotografiách západu Slnka) je pokles jasnosti od stredu slnečného disku k jeho okraju. Tento jav je známy pod názvom okrajové stemnenie.

Žiarenie zo Slnka je emitované z nie presne definovaného povrchu, ale prichádza k nám z asi 600 - 700 km hrubej vrstvy – fotosféry. Vo fotosfére závisia fyzikálne parametre od optickej hĺbky τ . Dva z týchto parametrov sú pre okrajové stemnenie kľúčové: teplota T a absorpčný koeficient κ_λ (charakterizujúci „stratu“ žiarenia na jednotku dĺžky). Obidva tieto parametre narastajú s narastajúcou hĺbkou, teda so znižujúcou sa vzdialenosťou od stredu Slnka (Neckel, 1996). A tak blízko okraja slnečného disku nameriame iné hodnoty týchto parametrov ako v jeho strede, pretože vidíme do menšej hĺbky, keďže náš zorný lúč prechádza cez fotosféru pod nenulovým uhlom θ (obr. 2.1). Teda istá hodnota optickej hĺbky definuje vrstvu fotosféry, ktorá prispieva k vyžarovaniu. Priebeh teploty vo vrstve definuje množstvo žiarenia emitovaného touto vrstvou. Úloha uhlu θ je zjavná z obrázku 2.1, teda čím väčší uhol θ , tým menšia hĺbka vrstvy, ktorá je zodpovedná za vyžarovanie. Táto hĺbka sa mení približne ako funkcia $\cos(\theta)$. Z okraja slnečného disku ($\theta = 90^\circ$, $\cos(\theta) = 0$) tak prijímame žiarenie len z najvyššej vrstvy fotosféry, preto

sa okraj slnečného disku zdá byť tmavší ako jeho centrum.



Obr. 2.1 Okrajové stemnenie – okraj slnečného disku sa nám javí tmavší kvôli tomu, že pri okraji vidíme do menšej hĺbky (pozeráme sa pod uhlom θ) a zároveň teplota T_H je väčšia ako T_L , teda sa pozeráme do vrstvy, z ktorej je emitované menej žiarenia.

2.3 Projekcia objektov v slnečnej atmosfére

Počas prechodu od východného po západný okraj slnečného disku zdanlivo mení svoj tvar aj penumbra slnečnej škvry. Penumbra je oblasť, ktorá zvyčajne obklopuje tmavšiu, centrálnu časť škvry – umbru. Keď sa slnečná škvra nachádza v blízkosti západného okraja disku, východná časť penumbry je tenšia ako jej západná časť. Tento jav je známy pod názvom Wilsonov efekt, ktorý hovorí, že slnečnú škvru si môžeme predstaviť ako 500 až 700 km hlbokú zníženinu (depresiu tvaru taniera) vo fotosfére (Priest, 1982). Táto depresia vzniká v dôsledku toho, že slnečná škvra je chladnejšia ako okolitá fotosféra a tak môžeme vidieť do väčšej hĺbky ako vo fotosfére. Spektrálne čiary, ktoré pozorujeme priamo v umbre sú tvorené hlbšie voči okolitej fotosfére. Keď sa škvra nachádza na okraji disku, je zrejmé, že vďaka projekcii sa časť penumbry bližšie k okraju disku javí hrubšia ako časť, ktorá je vzdialenejšia od okraja slnečného disku.

Asi k najvýraznejším zmenám, spôsobenými projekciou dochádza pri pozorovaní rôznych plazmatických štruktúr (akými sú napríklad protuberancie) vystupujúcich z fotosféry alebo chromosféry do rôznych výšok v slnečnej atmosfére. Protuberancie môžeme pozorovať nad okrajom ešte pred tým ako sme schopný pozorovať ich najspodnejšie časti, ktoré sa dotýkajú fotosféry za viditeľným okrajom disku. Počas prechodu protuberancie okrajom slnečného disku sa jej tvar mení značne dramaticky. Táto zmena je spôsobená projekciou danej protuberancie, teda nie iba zmenou vyvolanou reálnym vývojom protuberancie.

Projekčné efekty sú dôležité aj pre iné vlastnosti ako len pre exaktné skúmanie výšky a tvaru protuberancie. Už len filamentárna štruktúra slnečnej plazmy sama o sebe spôsobuje niekoľko pozoruhodných javov, pokiaľ dochádza k prekryvaniu sa jemných štruktúr v smere zorného lúča. Pre objekty akými sú protuberancie, kde os štruktúry je oveľa dlhšia ako jej veľkosť v ostatných smeroch, efekt pozorovania cez viaceré vrstvy podstatne závisí od uhla medzi protuberančnou osou a zorným lúčom (Wiik, Schmieder, Noens 1994).

Jednými z ďalších dôležitých útvarov, ktorých pozorovaný tvar závisí od umiestnenia na slnečnom disku, sú koronálne slučky. Tieto uzatvorené plazmatické útvary nachádzajúce sa pozdĺž magnetických siločiar dosahujú dĺžku až 100 000 km. Môžu sa teda nachádzať mimo slnečného disku a taktiež ich rovina môže byť sklonená voči slnečnej kolmici. Preto je veľmi dôležité zohľadniť projekčné efekty pri vyhodnocovaní nameraných dát a jednotlivé pozorované súradnice prepočítať do heliografických súradníc a následne do súradnicového systému roviny danej koronálnej slučky (Aschwanden, 1999).

2.4 STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory)

STEREO je prvá kozmická misia dvoch takmer rovnakých sond STEREO-A (Ahead) a STEREO-B (Behind) súčasne pozorujúcich Slnko z dvoch vzdialených bodov, čo umožňuje získať trojrozmerný (stereoskopický) obraz erupčných procesov i pokojných štruktúr v slnečnej atmosfére a heliosfére. V plnej prevádzke je od decembra roku 2006. Hlavnou úlohou misie je riešenie problému pôvodu, vývoja a dôsledkov výronov koronálnej hmoty (CMEs), čo má prispieť k zlepšeniu predpovedí kozmického počasia (http://www.ta3.sk/news/archive/archive_sk-q1_2007.php). Anaglyf slnečného disku sa nachádza v Prílohe č. 1.

3 KOREKCIA VEKTOROVÝCH MAGNETOGRAMOV

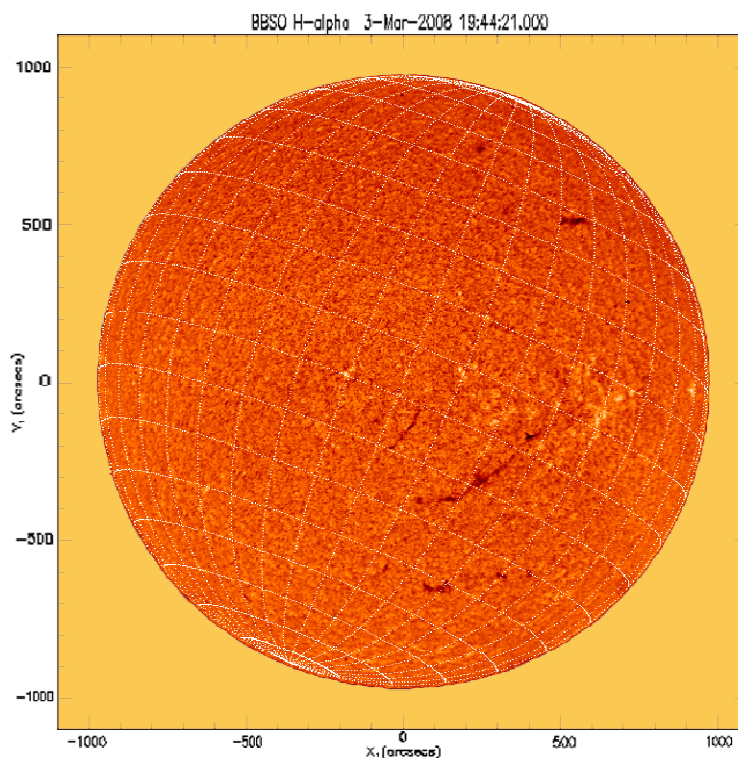
Informácie o magnetickom poli Slnčnej fotosféry získavame pomocou vektorových magnetografov. Tieto informácie sú zaznamenané na vektorových magnetogramoch, ktoré obsahujú veľkosť a orientáciu (polaritu) pozdĺžnej zložky magnetického poľa B_L (zložka smerujúca k pozorovateľovi pozdĺž zorného lúča), veľkosť transverzálnej zložky magnetického poľa B_T (zložka kolmá na B_L) a veľkosť uhla Φ medzi B_T a osou Y_I smerujúcou k nebeskému severu, meraného v kladnom smere. Alternatívne môžu vektorové magnetogramy obsahovať namiesto B_T a Φ informácie o veľkosti zložiek B_{X_1} a B_{Y_1} , kde os X_I smeruje k západu. V súčasnosti však meranie celého vektora magnetického poľa patrí stále k náročným experimentálnym úlohám a údaje o celom vektore magnetického poľa sa získavajú len z relatívne malých oblastí na slnečnom disku. Tieto pozorovania vykonáva okrem japonskej družice HINODE iba niekoľko pozemských pozorovacích staníc a dostupnosť ich dát je zvyčajne malá. Častejším prípadom je meranie samotnej B_L . Merania tejto zložky na celom disku Slnka dnes rutinne vykonáva napr. prístroj MDI (Michelson Doppler Imager, (Scherrer a kol., 1995)) na sonde SOHO a tieto dáta sú voľne prístupné na internete (<http://soi.stanford.edu/data/>)

Magnetogramy získané z oblasti mimo centra slnečného disku sú však ovplyvnené projekčnými efektmi. Z tohto dôvodu zložka B_L nezodpovedá B_z , zložke magnetického poľa smerujúca zo slnečného povrchu pozdĺž lokálnej vertikály. Preto je nutné vykonať deprojekciu nameraného magnetického poľa. Vykonanie deprojekcie je veľmi dôležitou súčasťou procesu spracovania dát. Hagyard (1987) ukázal, že ak sa pri výpočte potenciálového poľa použije ako okrajová podmienka zložka B_z namiesto B_L , dosiahne sa oveľa väčšia podobnosť tvaru magnetického poľa slnečných škvŕn k všeobecne akceptovanému modelu. Potrebnosť deprojekcie jednotlivých zložiek magnetického poľa sa ukazuje aj pri meraní oblasti magnetického strihu, čo je oblasť kde vzniká rozdiel $\Delta\Phi$ medzi azimutom transverzálnej zložky vypočítanej z B_L v potenciálovej aproximácii ($\text{rot}(\mathbf{B}_p) = \mathbf{0}$) a medzi nameranou B_T na

neutrálnej čiare (čiara oddeľujúca dve oblasti vo fotosfére s opačnou polaritou magnetického poľa). Venkatakrishan, Hagyard a Hathaway (1988) použitím deprojekcie zistili, že dĺžka oblasti magnetického strihu na deprojektovaných magnetogramoch rapídne klesá v porovnaní s jej dĺžkou v nedeprojektovaných vektorových magnetogramoch najmä v oblastiach mimo výskytu erupcií. Pozorovaná oblasť strihu je teda v dôsledku projekčných efektov zväčšená. Podobne fakt, že pre oblasti príliš ďaleko od stredu disku je nameraná pozdĺžna zložka iná ako vertikálna, je príčinou vzniku tzv. parazitných polarít vyskytujúcich sa často v SOHO/MDI magnetogramoch – polarít s iným znamienkom, než sa tam skutočne vyskytuje. Pozorujeme teda inú polaritu ako by sme pozorovali v prípade, keby sa oblasť nachádzala v strede disku.

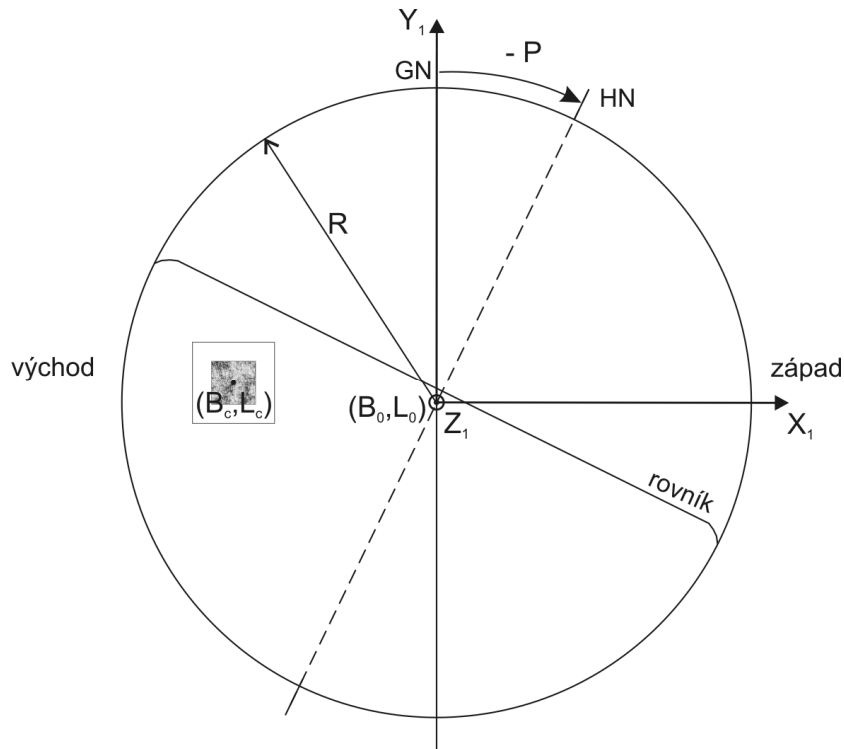
3.1 Transformácia rovinných súradníc magnetogramu do heliografických súradníc

Obrázok 3.1 znázorňuje typický príklad pozorovania Slnka v čiare $H\alpha$. Vidíme, že disk Slnka je natočený vzhľadom k smeru osi Y_1 , ktorá smeruje do severného nebeského pólu.



Obr. 3.1 Snímka Slnka zaznamenaná v čiare $H\alpha$ na Big Bear Solar Observatory (BBSO) dňa 3. 3. 2008 o 19:44 UT. Zobrazená je heliografická súradnicová sieť. Os Y_1 smeruje k severnému nebeskému pólu a os X_1 na západ.

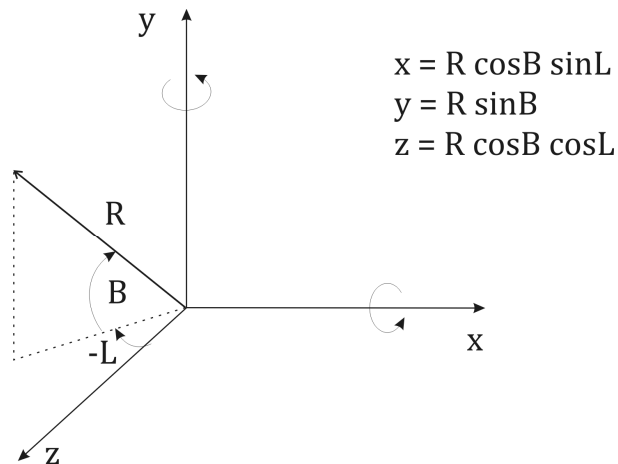
Transformácia rovinných súradníc magnetogramu do heliografických súradníc povrchu Slnka vyplýva z obrázku 3.2.



Obr. 3.2 Geometrická situácia pri pozorovaní Slnka. Severný nebeský pól GN leží v smere osi Y_1 . Rovina oblohy je rovina X_1Y_1 . Znárodné sú heliografické súradnice systému použité v transformácii.

Karteziánske súradnice obrazovej roviny magnetogramu (lokálnej roviny dotykovej na nebeskú sféru) sú X_1, Y_1 . Os Z_1 je na nich kolmá a smeruje od stredu Slnka cez stred disku k pozorovateľovi. Heliografické súradnice bodu na slnečnom povrchu sú heliografická šírka B , počítaná od rovníka v kladnom smere k heliografickému severnému pólu HN a heliografická dĺžka L , počítaná v kladnom smere na západ od Carringtonovho poludníka, ktorý vykoná jeden obeh okolo slnečnej osi za 27, 245 dňa (Hajduk a kol, 1987). Vizuálny stred disku má súradnice (B_0, L_0) . Slnečný polomer je R , P je pozičný uhol heliografického severného pólu HN, meraný od svetového severného pólu GN smerom na východ. Štvorec na obr. 3.2 s centrom v bode (B_c, L_c) znázorňuje zorné pole vektorového magnetografu. V rovinných súradniciach je centrum magnetogramu označené ako (X_{1c}, Y_{1c}) .

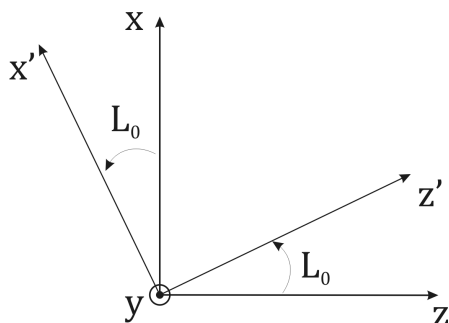
Obrázok 3.3 znázorňuje orientáciu B a L a taktiež uvádza základnú transformáciu akéhokoľvek bodu udaného v karteziánskych súradniciach do sférických súradníc .



Obr. 3.3 Transformácia karteziánskych súradníc (x, y, z) do sférických (R, L, B) . Karteziánska súradnicová sústava je pravotočivá s počiatkom v strede Slnka. Os y smeruje k heliografickému severnému pólu a os x k heliografickému západu. Os z smeruje k priesečníku rovníka s centrálnym meridiánom, ktorý je na tomto obrázku totožný s Carringtonovým poludníkom.

Z obr. 3.2 vyplýva, že vo všeobecnosti sa súradnicové centrum pozorovaného disku nemusí zhodovať s priesečníkom rovníka s centrálnym meridiánom. Pre transformáciu súradníc magnetogramu do heliografických súradníc je preto potrebné spraviť sadu rotácií tak, aby sa poloha centra disku zhodovala s polohou počiatku súradnicového systému a heliografický pozičný uhol P sa rovnal nule, t.j. vykoná sa sada rotácií medzi súradnicovými systémami danými osami X_1, Y_1, Z_1 , resp. x, y, z .

Najprv vykonáme rotáciu okolo osi y o uhol L_0 :

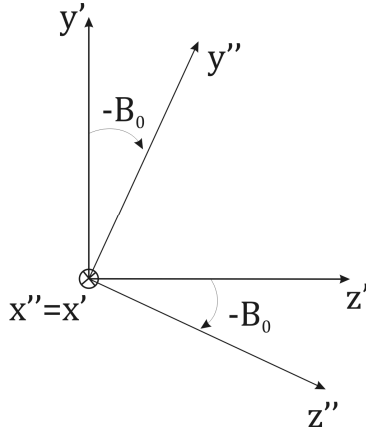


$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos L_0 & 0 & -\sin L_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin L_0 & 0 & \cos L_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Obr. 3.4 Transformácia medzi súradnicovou sústavou (x, y, z) a (x', y', z') .

Vykonáme tak transformáciu medzi súradnicovou sústavou x, y, z a súradnicovou sústavou x', y', z' , ktorá je pootočená okolo osi y o uhol L_0 , t. j. uhol medzi centrálnym meridiánom a Carringtonovým poludníkom.

Následne spravíme rotáciu okolo novej osi x' o uhol $-B_0$.

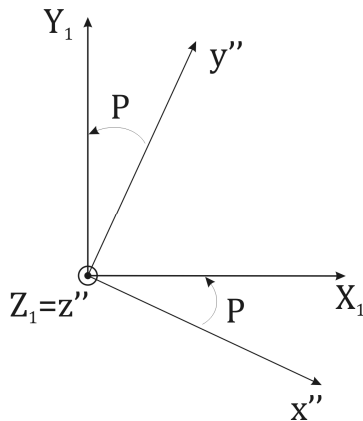


$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-B_0) & -\sin(-B_0) \\ 0 & \sin(-B_0) & \cos(-B_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Obr. 3.5 Transformácia medzi súradnicovou sústavou (x', y', z') a (x'', y'', z'') .

Transformujeme tak súradnicovú sústavu x', y', z' na súradnicovú sústavu x'', y'', z'' , ktorá je pootočená okolo osi x' o uhol $-B_0$, čo je uhol medzi rovníkom a stredom disku.

Nakoniec opravíme polohu slnečného severného pólu o pozičný uhol.



$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos P & \sin P & 0 \\ -\sin P & \cos P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Obr. 3.6 Transformácia medzi súradnicovou sústavou (x'', y'', z'') a (X_1, Y_1, Z_1) .

Vykonáme tak transformáciu medzi súradnicovou sústavou x'', y'', z'' a súradnicovou sústavou X_1, Y_1, Z_1 , ktorá je pootočená okolo osi z'' o pozičný uhol P .

Vyjadrenie konkrétneho bodu v magnetograme so súradnicami X_1, Y_1, Z_1 v heliografických súradniciach dostaneme teda vynásobením príslušných

uvedených rotačných matíc a vektora polohy bodu v magnetograme vyjadreného v sférických súradniciach R, B, L .

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos P & \sin P & 0 \\ -\sin P & \cos P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \quad (3.4)$$

$$\times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos B_0 & \sin B_0 \\ 0 & -\sin B_0 & \cos B_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos L_0 & 0 & -\sin L_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin L_0 & 0 & \cos L_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \cos B \sin L \\ R \sin B \\ R \cos B \cos L \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos P & \sin P & 0 \\ -\sin P & \cos P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \cos B \sin(L - L_0) \\ R \sin B \cos B_0 + R \cos B \sin B_0 \cos(L - L_0) \\ -R \sin B \sin B_0 + R \cos B \cos B_0 \cos(L + L_0) \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Pretože Slnko vidíme ako disk, zo vzťahu (3.5) sú pre nás dôležité len súradnice v rovine magnetogramu (X_1, Y_1) . Súčasné magnetogramy majú limitované zorné pole, jednotlivé body magnetogramu sú len relatívne málo vzdialené od polohy jeho centra. Rozdiel heliografických polôh jednotlivých bodov magnetogramu a polohy centra magnetogramu označíme $(\delta L, \delta B)$. Pre výpočet heliografických polôh jednotlivých bodov magnetogramu môžeme teda rozvinúť vzťah (3.5) do Taylorovho radu okolo centra magnetogramu $(B_C, L_C) = (X_{1C}, Y_{1C})$, pričom ponecháme len členy lineárne v δL a δB (Venkatakrisnan, Hagyard a Hathaway, 1988). Dostaneme:

$$\begin{aligned} \delta X_1 &= X_1 - X_{1C} = \cos B_0 \sin(L - L_0) - \cos B_C \sin(L_C - L_0) = \\ &= \cos L_0 (\delta L \cos B_C \cos L_C + \cos B_C \sin L_C - \delta B \sin B_C \sin L_C - \cos B_C \sin L_C) - \\ &\quad - \sin L_0 (\cos B_C \cos L_C - \delta L \cos B_C \sin L_C - \delta B \sin B_C \cos L_C - \cos B_C \cos L_C) = \\ &= \delta L \cos B_C \cos(L_C - L_0) - \delta B \sin B_C \sin(L_C - L_0) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \delta Y_1 &= Y_1 - Y_{1C} = \cos B_0 \sin B + \sin B_0 \cos B \cos(L - L_0) - \cos B_0 \sin B_C - \\ &\quad - \sin B_0 \cos B_C \cos(L_C - L_0) = \\ &= \delta B (\cos B_0 \cos B_C - \sin B_C \sin B_0 \cos L_0 \cos L_C - \sin B_C \sin B_0 \sin L_0 \sin L_C) - \\ &\quad - \sin B_0 \cos B_C \cos(L_C - L_0) - \delta L (\sin L_C \cos L_0 \sin B_0 - \cos L_C \sin L_0 \sin B_0) \cos B_C + \\ &\quad + \sin B_0 \cos B_C \cos L_C \cos L_0 + \sin B_0 \cos B_C \sin L_C \sin L_0 = \end{aligned}$$

$$= -[\sin B_0 \sin(L_C - L_0)] \cos B_C \delta L + \\ + [\cos B_0 \cos B_C - \sin B_C \sin B_0 \cos(L_C - L_0)] \delta B \quad (3.7)$$

V maticovom zápise teda platí:

$$\begin{pmatrix} \delta X_1 \\ \delta Y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos P & \sin P \\ -\sin P & \cos P \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \cos(L_C - L_0) & -\sin B_C \sin(L_C - L_0) \\ -\sin B_0 \sin(L_C - L_0) & \cos B_0 \cos B_C - \sin B_C \sin B_0 \cos(L_C - L_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \cos B_C \delta L \\ R \delta B \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Tým sme získali všeobecnú transformáciu medzi heliografickými súradnicami a rovinnými súradnicami magnetogramu.

3.2 Transformácia magnetického poľa magnetogramu do deprojekovaného magnetického poľa

Oblasti, ktoré sa nachádzajú blízko centra slnečného disku sú málo ovplyvnené projekčnými efektmi, preto zložka z magnetického poľa v heliografických súradniciach B_z^h je veľmi podobná pozorovanej pozdĺžnej zložke magnetického poľa B_L . Deprojekciu „nultého rádu“ z B_L na B_z^h možno s dostatočnou presnosťou vykonať vzťahom (napr. Dudík a kol., 2008):

$$B_z^h = \frac{B_L}{\cos \Omega} \quad (3.9)$$

kde $\Omega = \sqrt{\varphi^2 + \psi^2}$, pričom φ a ψ sú uhlové vzdialenosti stredu magnetogramu a centra disku merané v smere osi x a y . Platí pre ne $\varphi = \arcsin\left(\frac{X_C}{R}\right)$, $\psi = \arcsin\left(\frac{Y_C}{R}\right)$. Táto deprojekcia sa často využíva v literatúre pracujúcej len s magnetogramami obsahujúcimi iba pozdĺžnu zložku magnetického poľa.

Pre oblasti nachádzajúce sa ďalej od centra slnečného disku ($\Omega \geq 25^\circ$) približný vzťah (3.9) neplatí a na deprojekciu jednotlivých zložiek magnetického poľa magnetogramu je potrebné opäť využiť sériu rotácií analogických ku vzťahu (3.5), (Gary a Hagyard, 1990).

$$\begin{pmatrix} B_x^h \\ B_y^h \\ B_z^h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos P & -\sin P & 0 \\ \sin P & \cos P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos B_0 & -\sin B_0 \\ 0 & \sin B_0 & \cos B_0 \end{pmatrix} \times \quad (3.10)$$

$$\times \begin{pmatrix} \cos(L - L_0) & 0 & \sin(L - L_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(L - L_0) & 0 & \cos(L - L_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos B & \sin B \\ 0 & -\sin B & \cos B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{X_1}^i \\ B_{Y_1}^i \\ B_{Z_1}^i \end{pmatrix}$$

resp.

$$\begin{pmatrix} B_x^h \\ B_y^h \\ B_z^h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{X_1}^i \\ B_{Y_1}^i \\ B_{Z_1}^i \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

pričom pre jednotlivé koeficienty transformačnej matice A platí:

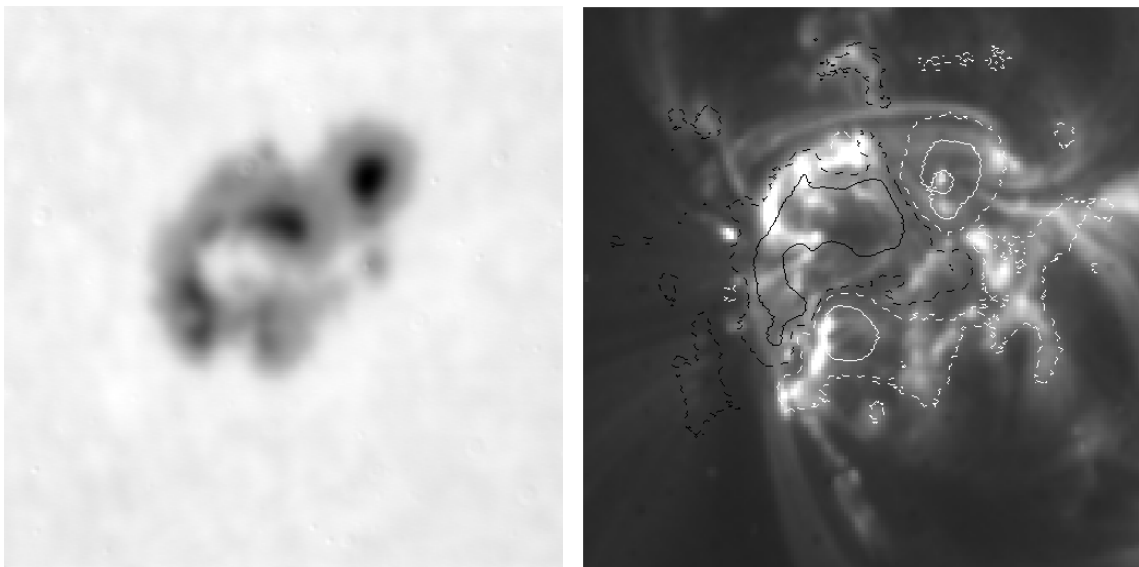
$$\begin{aligned} a_{11} &= +\cos P \cos(L - L_0) - \sin P \sin B_0 \sin(L - L_0) \\ a_{12} &= -\cos P \sin B \sin(L - L_0) - \sin P (\cos B \cos B_0 + \sin B_0 \sin B \cos(L - L_0)) \\ a_{13} &= +\cos P \cos B \sin(L - L_0) - \sin P (\sin B \cos B_0 - \sin B_0 \cos B \cos(L - L_0)) \\ a_{21} &= +\sin P \cos(L - L_0) + \cos P \sin B_0 \sin(L - L_0) \\ a_{22} &= -\sin P \sin B \sin(L - L_0) + \cos P (\cos B \cos B_0 + \sin B_0 \sin B \cos(L - L_0)) \\ a_{23} &= +\sin P \cos B \sin(L - L_0) + \cos P (\sin B \cos B_0 - \sin B_0 \cos B \cos(L - L_0)) \\ a_{31} &= -\cos B_0 \sin(L - L_0) \\ a_{32} &= +\cos B \sin B_0 - \cos B_0 \sin B \cos(L - L_0) \\ a_{33} &= +\sin B \sin B_0 + \cos B_0 \cos B \cos(L - L_0) \end{aligned}$$

kde B_q^h je zložka magnetického poľa pozdĺž heliografickej q – tej súradnice v mieste (X_I, Y_I) na magnetograme a B_p^i je p – tá zložka, vypočítaná z nameraného magnetického poľa. Index i označuje zložky v rovine obrazu (image plane), ktorá je totožná s rovinou oblohy. Index h prislúcha deprojektovaným zložkám. Zložky B_q^h by boli ekvivalentné zložkám B_p^i , ak by sa daná oblasť (stred magnetogramu) nachádzala v strede disku, $P = 0$ a zanedbali by sme odchýlky v dôsledku sférického tvaru slnečného povrchu.

4 DEPROJEKCIA MAGNETICKÉHO POĽA AKTÍVNEJ OBLASTI NOAA 10484

4.1 Aktívna oblasť NOAA 10484 a použité dáta

Deprojekcia pozorovaného magnetického poľa bola vykonaná na vektorovom magnetograme aktívnej oblasti NOAA 10484 získanom pomocou video magnetografu nainštalovanom na Solar Flare Telescope (Sakurai *a kol.*, 1995) v National Astronomical Observatory of Japan v Mitake dňa 23. októbra 2003 o 02:39 UT. Veľkosť zorného poľa prístroja je $340'' \times 320''$. Rozlíšenie dostupných dát je 256×240 pixelov, pričom rozmer pixelu zodpovedá $1,32''$. Aktívna oblasť NOAA 10484 obsahovala dvojicu veľkých škvŕn kladnej a zápornej polarity a niekoľko menších škvŕn. Dňa 23. 10. 2003 sa nachádzala v blízkosti stredu slnečného disku (Príloha č. 2) a vyskytlo sa v nej niekoľko stredne silných erupcií triedy M.



Obr. 4.1: Vľavo: Aktívna oblasť NOAA 10484 pozorovaná v bielom svetle pomocou Solar Flare Telescope v Mitake. Vpravo: Snímka časti koróny aktívnej oblasti NOAA 10484 získaná vo filtri 19,5 nm pomocou prístroja EIT (EUV Imaging Telescope) na sonde SOHO. Kontúry znázorňujú veľkosť pozdĺžnej zložky magnetického poľa pozorovaného magnetografom v Mitake. Plná čiara zodpovedá veľkosti polarite $5 \cdot 10^{-2} T$, prerušovaná čiara vyznačuje oblasť polarite s veľkosťou $10^{-2} T$. Čierna, resp. biela farba zodpovedá zápornej, resp. kladnej polarite. Zorné pole na oboch obrázkoch zodpovedá zornému poľu vektorového magnetografu.

4.2 Popis programového balíka

Dáta zo získaného magnetogramu obsahujú informácie o pozdĺžnej zložke magnetického poľa $B_L = B_{Z_1}$ a transverzálnych komponentách B_{X_1} a B_{Y_1} . Zložky B_{X_1} a B_{Y_1} však treba ešte opraviť o 180° nejednoznačnosť, ktorá je fundamentálnou vlastnosťou metódy merania Zeemanovho rozštiepu čiar. Za účelom odstránenia tejto dvojznačnosti bol vyvinutý program *fi.pro* (Príloha č.3), ktorý z kombinácie komponent (B_{X_1}, B_{Y_1}) , resp. $(-B_{X_1}, -B_{Y_1})$ vyberie pre každý pixel magnetogramu tú, ktorá zvierá menší uhol so zložkami $(B_{X_{1p}}, B_{Y_{1p}})$ vypočítanými v potenciálovej aproximácii pomocou vzťahu (Roumeliotis, 1996):

$$\mathbf{B}_p(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \iint \mathbf{B}_L(X_1, Y_1) \frac{\mathbf{r}-\mathbf{r}_1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_1|^3} dX_1 dY_1 \quad (4.1)$$

kde \mathbf{B}_p je vypočítaný vektor potenciálového magnetického poľa pre všetky zložky polohového vektora \mathbf{r} , pričom integrujeme pozorovanú pozdĺžnu zložku magnetického poľa \mathbf{B}_L cez celú rovinu magnetogramu zadanú súradnicami X_1 a Y_1 . Tento výpočet spravíme pomocou programu *potrou1.pro* (Príloha č.4).

Po odstránení 180° nejednoznačnosti získame zložky $B_{X_1}^i, B_{Y_1}^i$ a $B_{Z_1}^i$, ktoré doprojektujeme na B_x^h, B_y^h a B_z^h pomocou vzťahu (3.10), ktorý je implementovaný v programe *magnet.pro* (Príloha č.5). Pri tom poznáme pozičný uhol P a heliografické súradnice centra disku (B_0, L_0) . Heliografické súradnice B a L jednotlivých pixelov získame pomocou Taylorovho rozvoju okolo centra magnetogramu (B_C, L_C) , kde platí $B = B_C + \delta B$ a $L = L_C + \delta L$. Súradnice (B_C, L_C) získame inverziou vzťahu (3.5), ktorý je implementovaný v programe *centrum.pro* (Príloha č.6), pričom využijeme známe súradnice pre daný magnetogram (X_{1C}, Y_{1C}) .

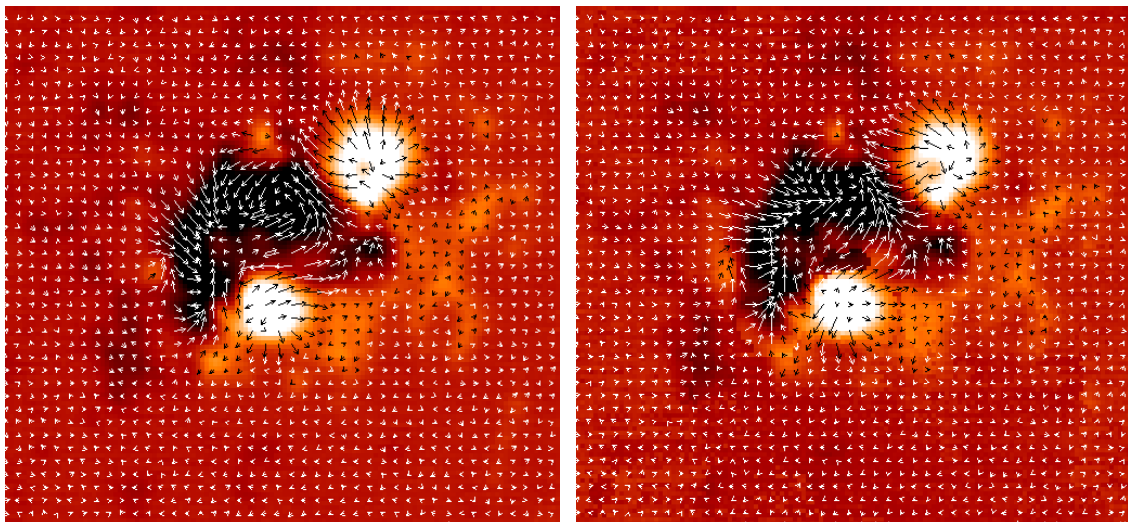
Sadu súradníc δB a δL dostaneme z inverzného vzťahu k vzťahu (3.8), ktorý je základom programu *surad.pro* (Príloha č.7). V tomto programe opäť využívame Taylorov rozvoj okolo centrálného bodu magnetogramu, čím

získame sadu súradníc δX_1 a δY_1 potrebnú pre inverzný vzťah (3.8). Sadu súradníc X_1 a Y_1 vstupujúcu do tohto rozvoja získame pomocou programu *pixel.pro* (Príloha č.8). Tento program, vďaka známym (X_{1C}, Y_{1C}) , rozmerom pixla a počtu pixlov v smere obidvoch osí vytvorí X_1 a Y_1 .

Vektorový magnetogram vykreslíme pomocou programu *m_gram.pro* (Príloha č.9). Vytvorený softwarový balík pracuje v prostredí SolarSoft implementovaným v programovacom jazyku IDL (Interactive Data Language).

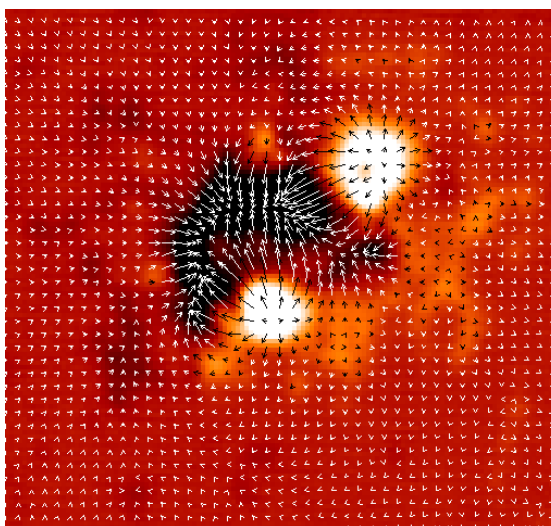
4.3 Výsledky

Obrázok 4.2 znázorňuje pozorovaný a deprojekovaný vektorový magnetogram aktívnej oblasti NOAA 10484. Biela farba zodpovedá kladnej polarite, čierna farba zápornej polarite. Tvar oblasti je zadaná zložkou B_L . Biele šípky znázorňujú veľkosť a orientáciu zložiek B_{X_1} a B_{Y_1} .

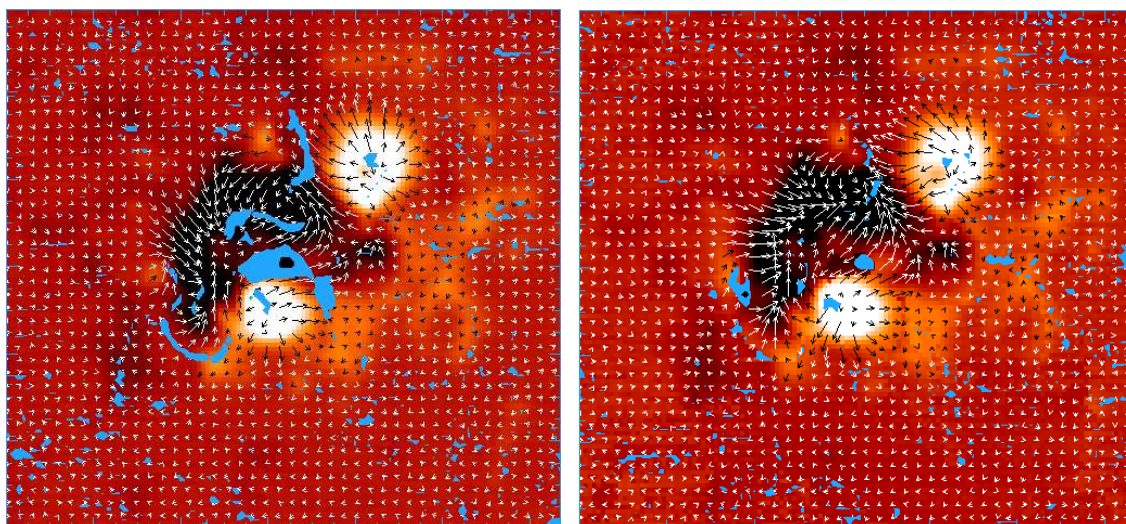


Obr. 4.2: Vľavo: vektorový magnetogram aktívnej oblasti NOAA 10484, získaný dňa 23. 10. 2003 o 02:39 UT pomocou vektorového magnetografu na Solar Flare Telescope v Mitake . Vpravo: deprojekovaný vektorový magnetogram.

Z porovnania vyplýva zmena orientácie transverzálnej komponenty v niektorých oblastiach zápornej polarity. Orientácia transverzálnej komponenty na deprojektovanom magnetograme sa viac približuje orientácii transverzálnej komponenty potenciálového poľa (Obr. 4.3).



Obr. 4.3: Vektorový magnetogram potenciálového magnetického poľa aktívnej oblasti NOAA 10484. Je tvorený nameranou zložkou B_L a zložkami $B_{X_{1p}}$ a $B_{Y_{1p}}$ vypočítanými z potenciálovej aproximácie vzťahom (4.1).



Obr. 4.4: Podobne ako obrázok 4.2, avšak so zvýraznenými oblasťami kde je oblasť magnetického strihu $\Delta\Phi > 0,45\pi$.

Potrebnosť deprojekcie vektorových magnetogramov vyplýva aj z obrázku 4.4, kde na deprojektovanom magnetograme je veľkosť oblasti veľkého magnetického strihu značne menšia ako na nedejektovanom magnetograme. Tým sme potvrdili výsledok Venkatakrišana, Hagyarda a Hathawaya (1988).

ZÁVER

Cieľom práce bolo odvodiť analytické transformačné vzťahy medzi súradnicami na povrchu Slnka a súradnicami v pozorovaných dátach za účelom transformácie fotosférického magnetogramu. Tento cieľ sa nám podarilo splniť. Taktiež sa nám podarilo vyvinúť sadu programov v prostredí IDL, ktoré pomocou implementovaných odvodených transformačných vzťahov vykonávajú deprojekciu nameraného magnetického poľa. Aplikáciu týchto programov sme vykonali na aktívnej oblasti NOAA 10484.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

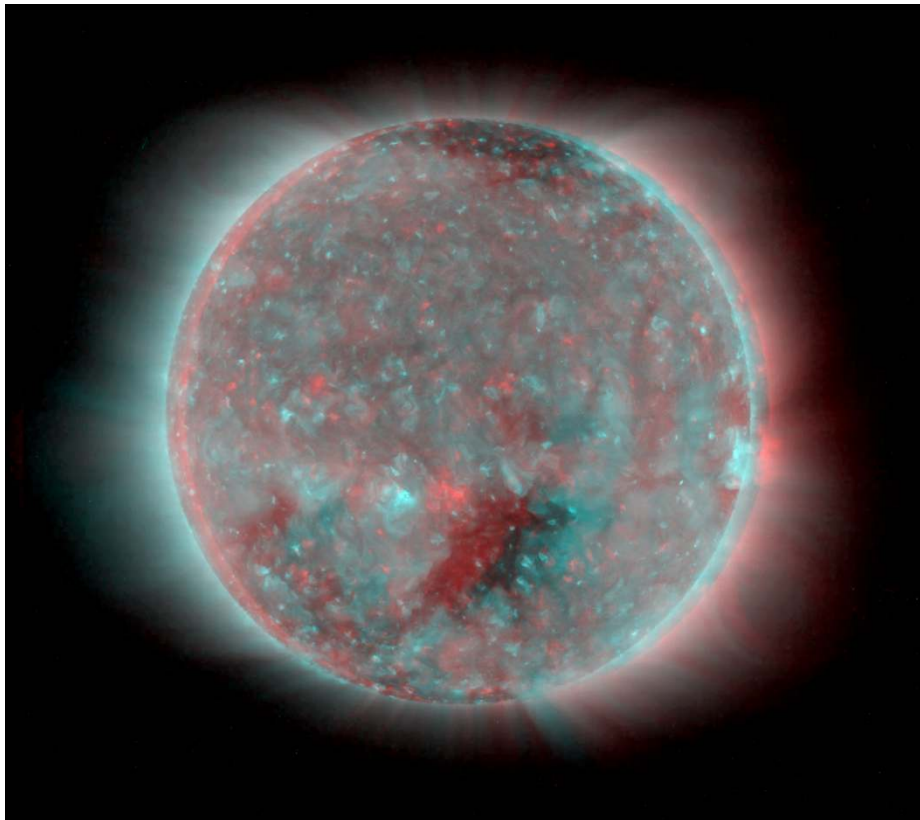
- Aschwanden, M. J., Newmark, J.S., Delaboudinière, J.P., a kol.: 1999, *Astrophys J.* **515**, 842
- Babcock, H. W.: 1961, *Astrophys J.* **133**, 572
- Bednář, J.: Pozoruhodné jevy v atmosféře, 1989, Academia nakladatelství Československé akademie věd, Praha
- Dudík, J., Aulanier, G., Schmieder, B., Bommier, V., Roudier, T.: 2008, *Solar Phys.* **248**, 29
- Foukal, P. V.: Solar Astrophysics, 2004, WILEY – VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany
- Gary, G. A., Hagyard, M. J.: 1990, *Solar Phys.* **126**, 21
- Hagyard, M. J.: 1987, *Solar Phys.* **107**, 239
- Hajduk a kol.: Encyklopédia astronómie, 1987, Obzor, Bratislava
- Neckel, H.: 1996, *Solar Phys.* **167**, 9
- Priest, E. R.: Solar Magnetohydrodynamics, 1982, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland
- Roumeliotis, G.: 1996, *Astrophys J.* **473**, 1095
- Sakurai T. a kol.: 1995, "Solar Flare Telescope at Mitaka", *Publ. Astron. Soc. Japan* **47**, 81
- Scherrer, P.H., Bogart, R.S., Bush, R.I., Hoeksema, J.T., Kosovichev, A.G., Schou, J., a kol.: 1995, *Solar Phys.* **162**, 129
- Venkatakrishan, P., Hagyard, M. J., Hathaway, D. H.: 1988, *Solar Phys.* **115**, 125
- Wiik, J. E., Schmieder, B., Noens, J. C.: 1994, *Solar Phys.* **149**, 51

Internetové odkazy:

- <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>
- http://www.ta3.sk/news/archive/archive_sk-q1_2007.php
- <http://soi.stanford.edu/data/>
- <http://stereo.gsfc.nasa.gov/gallery/3dimages/102107coronalhole.shtml>
- <http://www.solarmonitor.org/index.php?date=20031023>

PRÍLOHY

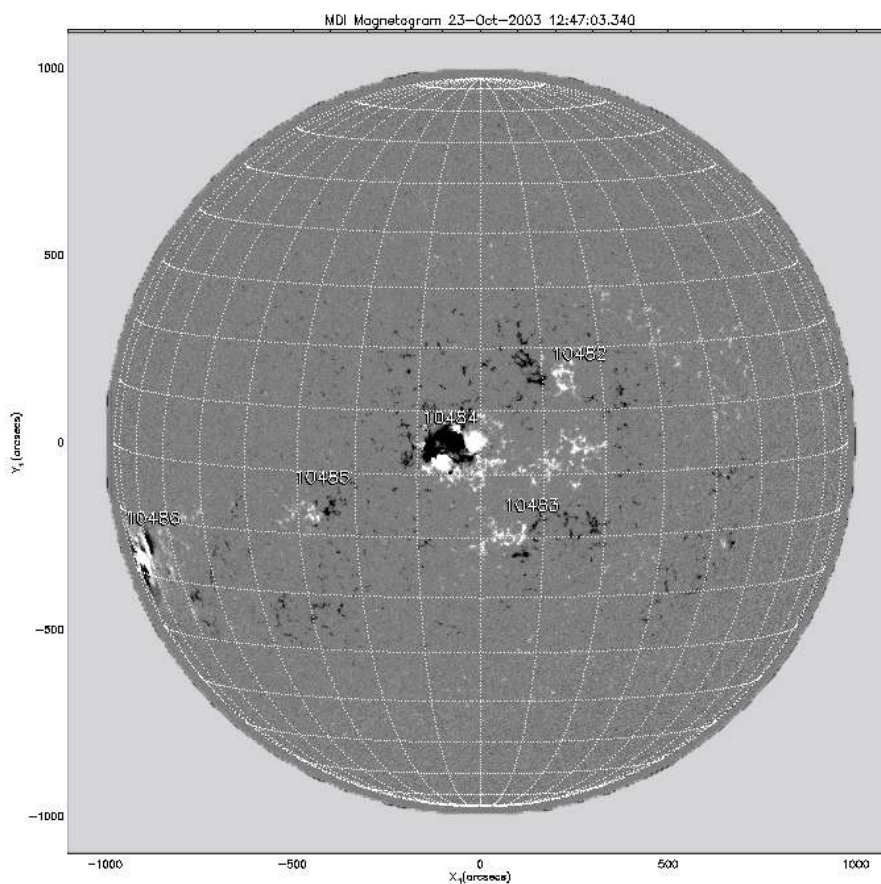
Príloha č. 1: Anaglyf slnečného disku



Anaglyf slnečného disku získaný v extrémnej UV časti spektra z dňa 21. Októbra 2007. Použitím 3D okuliarov (jedno resp. druhé oko vidí obrázok cez červený resp. modrý filter) možno vidieť 3D obraz Slnka. V tomto prípade sa však nejedná o zosnímanie z obidvoch sond STEREO súčasne, ale obrázok vznikol kombináciou dvoch snímok zo sondy STEREO B s časovým odstupom 12 hodín. Dôležitý objekt na disku – korónálna diera sa vyvíjala dostatočne pomaly na to aby sa mohla použiť táto technika.

<http://stereo.gsfc.nasa.gov/gallery/3dimages/102107coronalhole.shtml>

Príloha č. 2: MDI magnetogram slnečného disku



MDI (Michelson Doppler Imager) magnetogram slnečného disku zaznamenaný o 12:47 UT, z dňa 23. Októbra 2003. Aktívna oblasť NOAA 10484 sa nachádza blízko centra disk. Heliografické súradnice centra aktívnej oblasti $B_C=16''$ a $L_C = -19''$. <http://www.solarmonitor.org/index.php?date=20031023>

Príloha č. 3: fi.pro

```
pro fi, BX, BY, BX_p, BY_p, fi, BX_k, BY_k
```

```
;=====
;Oprava 180° nejednoznačnosti
;=====
```

```
info = size(Bx_p)
```

```
Nx = info(1)
```

```
Ny = info(2)
```

```

fi    = dblarr(Nx,Ny)
BX_k = dblarr(Nx,Ny)
BY_k = dblarr(Nx,Ny)

; BX_k, BY_k: opravene BX,BY

BX_k = BX
BY_k = BY

for i=0, Nx-1 do begin
    for j=0, Ny-1 do begin

        fi_1=acos((BX_p(i,j)*BX(i,j)+BY_p(i,j)*BY(i,j))/(sqrt(
            BX(i,j)^2D +BY(i,j)^2D +10^1D-
            8)*sqrt(BX_p(i,j)^2D +BY_p(i,j)^2D +10^1D-8)))
        fi_2=acos((-BX_p(i,j)*BX(i,j)-
            BY_p(i,j)*BY(i,j))/(sqrt(BX(i,j)^2D +BY(i,j)^2D
            +10^1D-8)*sqrt(BX_p(i,j)^2D +BY_p(i,j)^2D +10^1D-
            8)))

        if (abs(fi_1) LE abs(fi_2)) then fi(i,j)=fi_1 else begin
            fi(i,j)=fi_2
            BX_k(i,j)=-BX(i,j)
            BY_k(i,j)=-BY(i,j)
        endelse
    endfor
endfor
save, filename="c:\rsi\bakalarka\nove_fi.sav", fi, BX_k,
BY_k

end

```

Príloha č. 4: potrou1.pro

```

pro POT, BZ_nula, BX_p, BY_p, BZ_p

device, retain=2, decomposed=0

;=====
;Extrapolacia magnetickeho pola
;z magnetogramu pozdlznej zlozky MF
;v potencialovej aproximacii pomocou
;vztahu (2.1) v Roumeliotisovi (1996)
;=====

BZ_nula = double(BZ_nula)
BZ_nula_info = size(BZ_nula)

```

```

if (BZ_nula_info(0) NE 2) then begin
  print, "Magnetogram must be 2D. Terminating program."
  goto, jumpEND
endif

LX = BZ_nula_info(1)
LY = BZ_nula_info(2)
LZ = 2

print, lx, ly, lz

BX_p = dblarr(LX,LY,LZ)
BY_p = dblarr(LX,LY,LZ)
BZ_p = dblarr(LX,LY,LZ)

;print, max(BZ_p), min(BZ_p)

di = 1.0D0
dj = 1.0D0

for z = 0, LZ-1, 1 do begin
  for x = 0, LX-1, 1 do begin
    for y = 0, LY-1, 1 do begin

      for i = 0, LX-1, 1 do begin
        for j = 0, LY-1, 1 do begin

          D = sqrt((x-i)^2D + (y-j)^2D + (z)^2D)
          if (D LT 1D-6) then D = 1D-6

          BX_p(x,y,z) = BX_p(x,y,z) +
            (1D/(2D*!PI))*BZ_nula(i,j)*(x-i)*(1D/D^3)
          BY_p(x,y,z) = BY_p(x,y,z) +
            (1D/(2D*!PI))*BZ_nula(i,j)*(y-j)*(1D/D^3)
          BZ_p(x,y,z) = BZ_p(x,y,z) +
            (1D/(2D*!PI))*BZ_nula(i,j)*(z )*(1D/D^3)

          if (NOT FINITE( BX_p(x,y,z) )) then print, "Error.
            Not a number.", D

        endfor
      endfor
    endfor

    print, x,y,z
  endfor
  ;print, x,y,z
endfor

```

```

endfor

save, filename='C:\rsi\MF_In(32).sav', LX, LY, LZ, BX_p,
BY_p, BZ_p

    jumpEND:

end

```

Príloha č. 5: magnet.pro

```

pro magnet, deltaB, deltaL, B_0, L_0, B_c, L_c, P, B_k,
B_l, B_m, B_x, B_y, B_z

;=====
; Deprojekcia magnetickeho pola
;=====

info = size(deltaB)
Nx   = info(1)
Ny   = info(2)

k=4

device, retain=2, decomposed=0
window, 3, xsize=(k*Nx), ysize=(k*Ny)

; prevod nameranych dat zo stupnov na radiany
deltaB = deltaB *!dpi/180D
deltaL = deltaL *!dpi/180D
B_0    = B_0 *!dpi/180D
L_0    = L_0 *!dpi/180D
B_c    = B_c *!dpi/180D
L_c    = L_c *!dpi/180D
P      = P *!dpi/180D

B = dblarr(Nx,Ny)
L = dblarr(Nx,Ny)
B_proj = dblarr(3)
A      = dblarr(3,3)
B_obs  = dblarr(3)
B_x    = dblarr(Nx,Ny)
B_y    = dblarr(Nx,Ny)
B_z    = dblarr(Nx,Ny)

for i = 0, Nx-1 do begin
    for j = 0, Ny-1 do begin

```

```

B(i,j) = deltaB(i,j)+B_c
L(i,j) = deltaL(i,j)+L_c

A(0,0) = +cos(P)*cos(L(i,j)-L_0) -
        sin(P)*sin(B_0)*sin(L(i,j)-L_0)
A(0,1) = -cos(P)*sin(B(i,j))*sin(L(i,j)-L_0) -
        sin(P)*cos(B(i,j))*cos(B_0) -
        sin(P)*sin(B_0)*sin(B(i,j))*cos(L(i,j)-L_0)
A(0,2) = +cos(P)*cos(B(i,j))*sin(L(i,j)-L_0) -
        sin(P)*sin(B(i,j))*cos(B_0)+sin(P)*sin(B_0)*
        cos(B(i,j))*cos(L(i,j)-L_0)
A(1,0) = +sin(P)*cos(L(i,j)-
        L_0)+cos(P)*sin(B_0)*sin(L(i,j)-L_0)
A(1,1) = -sin(P)*sin(B(i,j))*sin(L(i,j)-
        L_0)+cos(P)*cos(B(i,j))*cos(B_0)+cos(P)*sin(B_0)*
        sin(B(i,j))*cos(L(i,j)-L_0)
A(1,2) = +sin(P)*cos(B(i,j))*sin(L(i,j)-
        L_0)+cos(P)*sin(B(i,j))*cos(B_0)-
        cos(P)*sin(B_0)*cos(B(i,j))*cos(L(i,j)-L_0)
A(2,0) = -cos(B_0)*sin(L(i,j)-L_0)
A(2,1) = +cos(B(i,j))*sin(B_0)-
        cos(B_0)*sin(B(i,j))*cos(L(i,j)-L_0)
A(2,2) =+sin(B(i,j))*sin(B_0)+cos(B_0)*cos(B(i,j))*
        cos(L(i,j)-L_0)

A=transpose(A)

B_obs(0) = B_k(i,j)
B_obs(1) = B_l(i,j)
B_obs(2) = B_m(i,j)

B_proj = A##B_obs

B_x(i,j) = B_proj(0)
B_y(i,j) = B_proj(1)
B_z(i,j) = B_proj(2)

endfor
endfor

tvsc1, congrid(B_z,k*Nx,k*Ny)

write_gif, "c:\rsi\picture\B_z.gif", tvrd ()

end

```

Príloha č. 6: centrum.pro

```

pro centrum, B_0, L_0, P, X_1c, Y_1c, R, B_c, L_c

```

```

;=====
;Korekcia polohy centra
;Slneceho disku
;=====

; prevod nameranych dat zo stupnov na radiany
B_0 = B_0 *!dpi/180D
L_0 = L_0 *!dpi/180D
P_0 = P_0 *!dpi/180D
R = double(R)

X_1c = asin(X_1c/R)
Y_1c = asin(Y_1c/R)
Z_1c = sqrt(!dpi/2D)^2D -X_1c^2D -Y_1c^2D)

A = dblarr(3,3)
B = dblarr(3,3)
C = dblarr(3,3)

A(0,0) = cos(P) & A(1,0) = sin(P) & A(2,0) = 0D
A(0,1) = -sin(P) & A(1,1) = cos(P) & A(2,1) = 0D
A(2,0) = 0D & A(2,1) = 0D & A(2,2) = 1D

C(0,0) = cos(L_0) & C(1,0) = 0D & C(2,0) = -sin(L_0)
C(0,1) = 0D & C(1,1) = 1D & C(2,1) = 0D
C(2,0) = sin(L_0) & C(2,1) = 0D & C(2,2) = cos(L_0)

B(0,0) = 1D & B(1,0) = 0D & B(2,0) = 0D
B(0,1) = 0D & B(1,1) = cos(B_0) & B(2,1) = sin(B_0)
B(2,0) = 0D & B(2,1) = -sin(B_0) & B(2,2) = cos(B_0)

; A,B,C: rotacne matice

h = invert(A)##[X_1c, Y_1c, Z_1c]
h = invert(B)##h
h = invert(C)##h

B_c = asin(h(1))
L_c = asin(h(0)/cos(B_c))

B_c = B_c*180/!dpi
L_c = L_c*180/!dpi
print, B_c, L_c

end

```

Príloha č. 7: surad.pro

```
pro surad, X_1, Y_1, X_1c, Y_1c, B_c, L_c , B_0, L_0, P,  
R, deltaB, deltaL
```

```
=====  
; Transformacia suradnic magnetogramu do  
; heliografickych suradnic  
=====  
  
; prevod nameranych dat zo stupnov na radiany  
B_c = B_c *!dpi/180D  
L_c = L_c *!dpi/180D  
B_0 = B_0 *!dpi/180D  
L_0 = L_0 *!dpi/180D  
P    = P    *!dpi/180D  
  
info = size(X_1)  
  
Nx    = info(1)  
Ny    = info(2)  
  
X_1c = asin(X_1c/R)  
Y_1c = asin(Y_1c/R)  
X_1  = asin(X_1/R)  
Y_1  = asin(Y_1/R)  
  
deltaX_1 = dblarr(Nx,Ny)  
deltaY_1 = dblarr(Nx,Ny)  
deltaL   = dblarr(Nx,Ny)  
deltaB   = dblarr(Nx,Ny)  
B_long   = dblarr(Nx,Ny)  
D        = dblarr(2,2)  
HP       = dblarr(2)  
;B_long: pozdlzna zlozka magnetickeho pola  
  
for i = 0, Nx-1 do begin  
  for j = 0, Ny-1 do begin  
    deltaX_1(i,j) = X_1(i,j)-X_1c  
    deltaY_1(i,j) = Y_1(i,j)-Y_1c  
  
    D(0,0) = cos(P)*(cos(L_c-L_0))+sin(P)*(-  
      sin(B_0)*sin(L_c-L_0))  
    D(0,1) = cos(P)*(-sin(B_c)*sin(L_c-  
      L_0))+sin(P)*(cos(B_0)*cos(B_c)-  
      sin(B_0)*sin(B_c)*cos(L_c-L_0))  
    D(1,0) = -sin(P)*(cos(L_c-L_0))+cos(P)*  
      (-sin(B_0)*sin(L_c-L_0))  
    D(1,1) = -sin(P)*(-sin(B_c)*sin(L_c-
```



```

        L_0)) + cos(P) * (cos(B_0) * cos(B_c) -
        sin(B_0) * sin(B_c) * cos(L_c - L_0))
;D: transformacna matica

    HP          = invert
(D)##[deltaX_1(i,j),deltaY_1(i,j)]
    deltaL(i,j) = HP(0)/cos(B_c)
    deltaB(i,j) = HP(1)

    ;HP: matica suradnic heliografickej roviny

endfor
endfor

;prevod vypocitanych dat z radianov, aby bol vysledok v
stupnoch
deltaB = deltaB * 180 / !dpi
deltaL = deltaL * 180 / !dpi

;print, deltaB, deltaL

end

```

Príloha č. 8: pixel.pro

```

pro pixel, X_1c, Y_1c, Nx, Ny, p_x, p_y, X_1, Y_1

;=====
;Nastavenie rozlisenia a velkosti pixla
;pri vytvarani magnetogramu
;=====

X_1 = dblarr(Nx,Ny)
Y_1 = dblarr(Nx,Ny)

for i = 0, Nx-1 do begin
    for j = 0, Ny-1 do begin
        X_1(i,*) = (i-1/2D + (X_1c/p_x - Nx/2D)) * p_x
        Y_1(*,j) = (j-1/2D + (Y_1c/p_y - Ny/2D)) * p_y
    endfor
endfor
; vystup X_1, Y_1 v oblukovych sekundach

X_1 = rebin(X_1, 128, 120)
Y_1 = rebin(Y_1, 128, 120)
; prebinované kvoly mensiemu rozliseniu ostatnych dat

end

```

Príloha č. 9: m_gram.pro

```
pro m_gram, k, step, B_z, B_x, B_y, fi, name

;=====
;Vykreslenie magnetogramu
;=====
device, retain=2, decomposed=0

r = indgen(256)
g = indgen(256)
b = indgen(256)

info = size(B_z)

Nx   = info(1)
Ny   = info(2)
print, nx, ny, k
xs1 = Nx*k
ys1 = Ny*k

loadct, 3
;loadct=load color table,
window, 3, xs=xs1, ys=ys1
tvsc1, congrid (B_z < 4e00 > (-500), k*Nx, k*Ny)

for i = 0, Nx-1, step do begin
    for j = 0, Ny-1, step do begin
        x0 = k*i
        y0 = k*j
        x1 = k*i+B_x(i,j)/30D
        y1 = k*j+B_y(i,j)/30D
        if (B_z(i,j) GE 100) then c=0 else c=16777215D
        arrow, x0,y0,x1,y1, hsize=4 ,color=c

    endfor
endfor

loadct, 1
contour, fi, pos=[0,0,nx*k -1,ny*k -1],/device,/xs,/ys,
/noerase, levels=[45*!dpi/100D], color=200, /fill
write_png, name, tvrd(true=1)

end
```