

Vizualizace fotosférických rychlostních polí

*M. Klvaňa, Astronomický ústav Akademie věd České republiky,
observatoř Ondřejov, Česká republika, mklvana @asu.cas.cz*
*M. Švanda, Astronomický ústav University Karlovy v Praze,
Česká republika, svanda @asu.cas.cz*
*V. Bumba, Astronomický ústav Akademie věd České republiky,
observatoř Ondřejov, Česká republika, bumba @asu.cas.cz*

Abstrakt:

Při výzkumu horizontálních rychlostních polí ve fotosféře jsme se setkali s problémem jejich vhodného zobrazení. Uvádíme důvody, proč jsme se v tomto případě rozhodli místo tradičních vektorů používat proudnice. Popisujeme vlastní algoritmus vykreslování proudnic, kritéria jejich použití a způsob ověření přesnosti při vykreslování proudnic. Výsledky dokumentujeme na obrazech rychlostních polí slunečního disku ze dne 26.05.1996.

1. ÚVOD

Na základě vlastních zkušeností i prací jiných autorů jsme dospěli k názoru, že vrstva fotosféry se v některých případech chová podobně, jako povrch kapaliny. Tento jev si vysvětlujeme malou výškou fotosférické vrstvy – cca 1 obl.sec. a změnou její hustoty přibližně o tři řády (Vernazza et al. 1981, Maltby et al. 1986). Stoupavé konvektivní pohyby jsou zřejmě limitovány tímto povrchem a v jeho blízkosti se postupně stáčejí do horizontálního směru. V supergranulárních strukturách jsou střední horizontální rychlosti přibližně o jeden řád větší než vertikální (Hathaway et al, 2002) a převládá tudíž horizontální rychlostní pole. Dominantní složku vertikálních rychlostních polí ve fotosférických dopplerogramech se středním prostorovým rozlišením tvoří hlavně vertikální komponenta oscilací.

Po odstranění oscilací považujeme proto horizontální proudění za hlavní složku *viditelného* pohybu hmoty ve sluneční fotosféře. Tyto pohyby zkoumáme prostřednictvím pohybu supergranulárních struktur. Supergranulární struktury mají dostatečně dlouhou životnost, pokrývají rovnoměrně celý sluneční disk a jsou dostatečně výrazné. Střední životní doba supergranulární cely se podle různých autorů pohybuje od 20 hodin (Simon & Leighton, 1964) do 72 hodin i více (Kubičela, 1976). Tyto objekty jsou dostatečně velké, neboť jejich střední velikost je uváděna od 15 obl.sec (Srikanth et al, 2000) do 40 obl.sec (Wang & Zirin, 1989).

Supergranulární struktury však nesledujeme z hlediska jejich vlastních vnitřních dopplerovských rychlostí. Předpokládáme, že tyto struktury jsou uná-

šeny podpovrchovým rychlostním polem a používáme je jako topologické tracery, které svým pohybem zviditelňují ve sluneční fotosféře hledané horizontální pohyby hmoty.

2. VLASTNOSTI RYCHLOSTNÍCH POLÍ

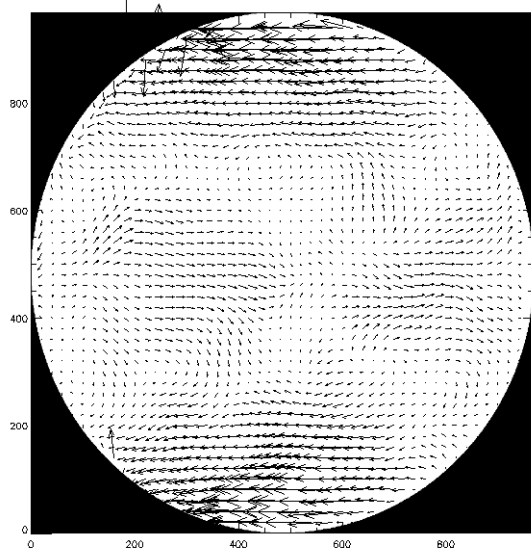
Rychlostní pole, nalezená sledováním pohybu supergranulárních struktur, vyjadřují pohyb hmoty po viditelném povrchu sluneční fotosféry. Jedná se převážně o horizontální vektorové rychlostní pole. Toto pole obsahuje pouze komponentu vektoru rychlosti v rovině tečné ke sluneční hemisféře. Komponenta, kolmá k této rovině, je nulová. V našich výpočtech promítáme vektor rychlosti do roviny slunečního disku a v této rovině ho také vykreslujeme.

3. ZOBRAZOVÁNÍ VEKTOROVÝCH POLÍ

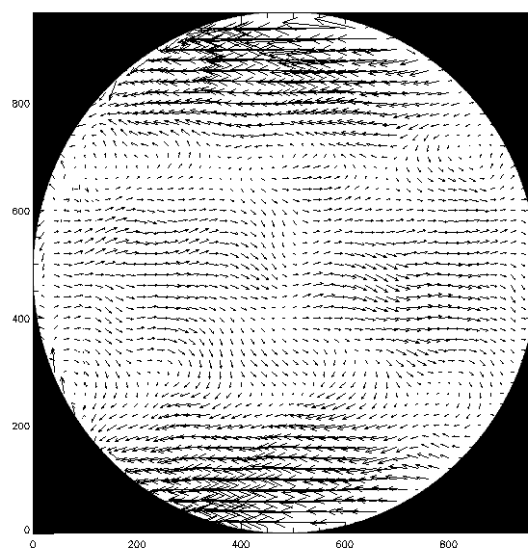
K zobrazování vektorových polí se nejčastěji používají orientované úsečky. Ve 3D zobrazení se tyto úsečky vykreslují v rovině průmětny a třetí rozměr se nahrazuje proměnnou intenzitou pozadí, případně se používají pomocné grafické metody zobrazení.

V našem případě se jedná o 2D zobrazení vektorového rychlostního pole v rovině průmětny, což znamená, že plně vystačíme se zobrazením vektoru orientovanou úsečkou.

Tato metoda je zcela jednoduchá, na první pohled dostatečně názorná a zdálo by se, že pro zobrazení jednotlivých vektorových polí zcela vyhovuje. Jak se však v našem případě ukázalo, tato metoda není



Obr.1: Vektorové rychlostní pole celého disku v čase A.



Obr.2: Vektorové rychlostní pole celého disku v čase B.

vhodná pro sledování změn rychlostních polí během jejich časového vývoje. Změny ve struktuře rychlostního pole při takovém způsobu zobrazení zanikají. Tato metoda vyžaduje určitý poměr mezi počtem zobrazovaných vektorů a vzdáleností mezi nimi a při zmenšení obrazu se ve vektorovém poli část informace ztrácí (viz obr.1 a obr.2).

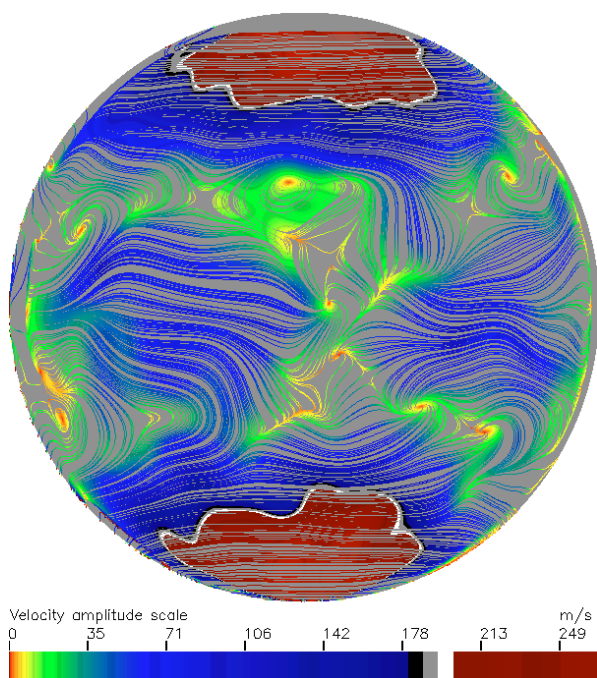
Sledování vývoje struktur je pro nás velmi důležité. Proto pohyb hmoty ve sluneční fotosféře znázorňujeme proudnicemi, které jsou na změny rychlostního pole velmi citlivé (obr.3 a obr.4).

4. ZOBRAZOVÁNÍ PROUDNIC

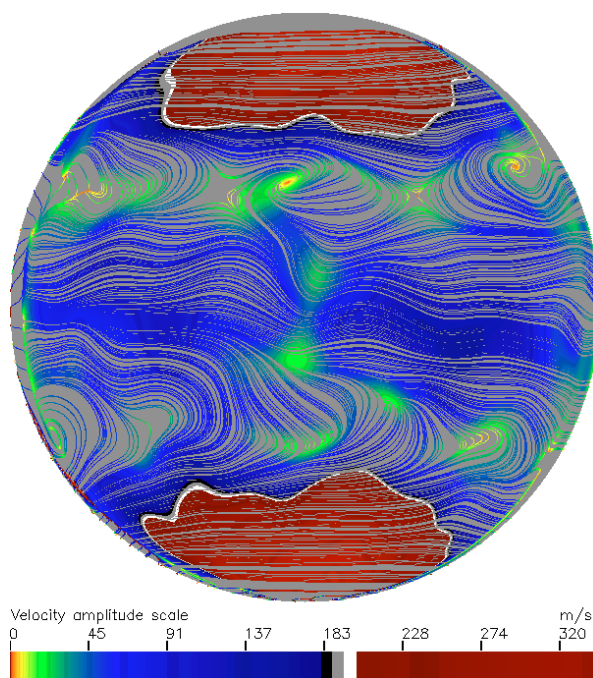
Primárními daty pro vykreslení proudnic je dvourozměrné vektorové rychlostní pole v obrazové rovině. V našem případě to bude rovina slunečního disku.

4.1 Standardní algoritmus

Proudnicí k začínáme kreslit v bodě A (obr.5). V datech zobrazovaného vektorového pole v bodě A najdeme vektor rychlosti V_A a ve směru tohoto vektoru ve vzdálenosti ds od A zakreslíme bod B .

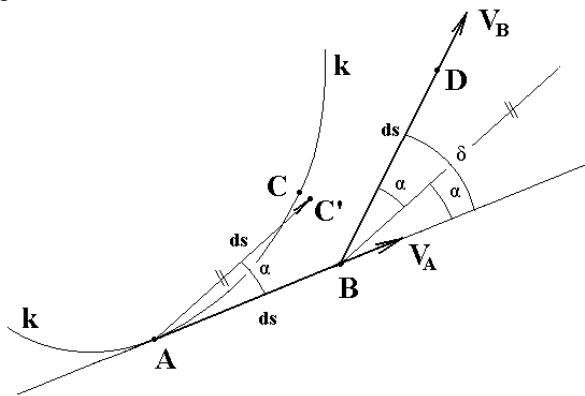


Obr.3: Proudnice rychlostního pole A. Proudnice jsou vykreslovány z bodů sítě v obou směrech v log. škále barev



Obr.4: Proudnice rychlostního pole B. Proudnice jsou vykreslovány z bodů sítě v obou směrech v log. škále barev

Stejným způsobem najdeme vektor V_B v bodě B . Tento nový vektor má nový směr, který svírá s vektorem V_A úhel $\delta = 2\alpha$. Ve vzdálenosti ds od bodu B najdeme ve směru vektoru V_B další bod proudnice – bod D . Toto je klasický postup pro vykreslování proudnic. Vidíme, že tímto postupem se značně odchylujeme od ideální křivky k a to vždy na opačnou stranu, než kde leží střed její křivosti v daném bodě. Při použití tohoto algoritmu nepotřebujeme pro vykreslení proudnic vůbec znát amplitudy rychlostí vektorového pole. Další varianta tohoto algoritmu bere do úvahy také amplitudy vektorů rychlostí. Místo konstantních přírůstků ds používáme v této variantě přírůstky proměnných délek, úměrné amplitudě rychlostí v daném bodě. V nehomogenních rychlostních polích však tento algoritmus může vést ještě k větším chybám, protože při velkých rychlostech se bod B může značně vzdálit od ideální křivky k a dostat se tak do oblasti se zcela odlišným vektorovým polem.



Obr.5: Sestrojení bodu C' proudnice. α – poloviční úhel mezi vektory V_A a V_B , k – ideální proudnice, kterou chceme sestrojit, ds – délka kroku pro vykreslování

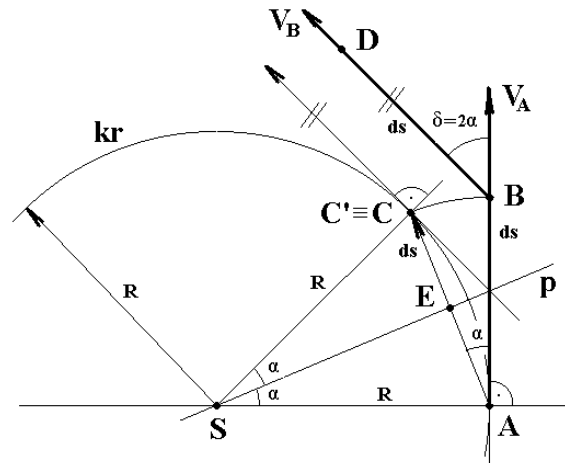
4.2 Algoritmus polovičního úhlu

Námi používaný algoritmus pracuje odlišným způsobem. Z úhlu δ , který svírají vektory V_A a V_B v bodech A a B , vypočteme úhel $\alpha = \delta/2$. Ve směru α sestrojíme z bodu A úsečku velikosti ds a dostáváme se do bodu C' . Bod C' není totožný s bodem C na ideální proudnici, ale jak je vidět z obr.5, jeho odchylka od ideální polohy je menší, než odchylka bodu D , získaného klasickým postupem. Vzniklá odchylka závisí na nehomogenitě vektorového pole a velikosti kroku ds .

Pokud se nám podaří pro dané ds dostatečně přesně aproximovat část křivky k mezi body A a C segmentem kružnice k_r , bude bod C' totožný s bodem C . Vzhledem k tomu, že každou hladkou křivku můžeme nahradit segmenty kružnic různých průměrů, můžeme tímto způsobem body ideální proudnice vykreslovat s větším krokem a přitom přesněji, než nám dovoluje klasický postup.

K dosažení dostatečně přesné aproximace křivky k segmentem kružnice k_r je třeba zvolit optimální velikost kroku ds . Předpokladem úspěchu je, že vektorové rychlostní pole je dostatečně hladké (proudnice mají charakter hladkých křivek) a bez

velkých gradientů úhlů ve směru kolmém ke směru proudnic (vektory rychlosti v bodech B a C se málo liší svým směrem). Tyto podmínky je možno zabezpečit vhodnou filtrací dat.



Obr.6: Aproximační kružnice k_r , nahrazující v úseku AC křivku ideální proudnice.

4.3 Zakřivení proudnic

Vztah mezi velikostí kroku ds a poloměrem R kružnice k_r , která aproximuje segment ideální proudnice k mezi body A a C , nalezneme z geometrických souvislostí v obr.6. Protože hledáme kružnici, aproximující ideální křivku k , musí být vektor V_A v bodě A tečný křivce k stejně jako této kružnici. Střed kružnice k_r musí proto ležet na přímce SA , kolmé k vektoru V_A . Hledaná kružnice má rovněž procházet bodem C , který jsme vykreslili naší metodou. Úsečka AC tvoří tětivu hledané kružnice k_r . Střed S kružnice k_r musí proto ležet na průsečíku její osy p s přímkou AS . Z geometrie trojúhelníků je zřejmé, že rovněž úhel ESA je roven α a z výrazu pro jeho sinus dostaneme vztah mezi poloměrem R kružnice k_r a velikostí kroku ds .

$$R = \frac{ds}{2 \sin \alpha} \quad (1)$$

Hladkost vektorových rychlostních polí je dostatečně zabezpečena, pokud byly dodrženy podmínky Nyquistova vzorkovacího teorému.

V případě našich vektorových rychlostních polí to znamená, že mezi dvěma sousedními body matice dat vektorového pole by se měly směrnice vektorů δ lišit o méně než 180° , to znamená, že limitní úhel, který by neměl být překročen, je

$$\alpha_{lim} = 90^\circ \quad (2)$$

Pokud použijeme měřítko zobrazení datového pole 1:1, bude každému pixelu vykreslovaného obrazu odpovídat jeden údaj vektorového pole rychlostí. Velikost pixelů (nebo vzdálenost pixelů) v tomto měřítku zobrazení označme Δ . To je také nejmenší vzdálenost, ve které můžeme vykreslit nový bod obrazu, to znamená, že

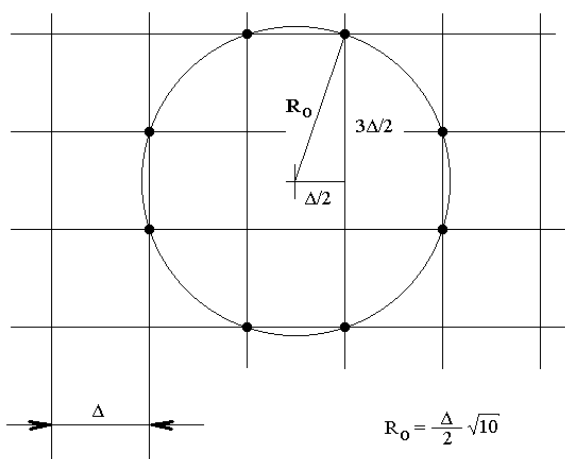
$$ds = \Delta \quad (3)$$

Dosazením (2) a (3) do rovnice (1) získáme minimální možný poloměr křivosti R_{lim} v obraze, limitovaný použitou hustotou vzorkování:

$$R_{lim} = \frac{\Delta}{2} \quad (4)$$

Nejmenší útvar, podobný kružnici, který jsme schopni z hlediska hustoty bodů obrazu vykreslit (šest bodů na kružnici), má však podle schématu na obr.7 poloměr

$$R_0 = \frac{\Delta}{2} \sqrt{10} \quad (5)$$



Obr.7: Velikost minimální kružnice R_0 , vyznačené šesti body. Δ je vzdálenost mezi středy pixelů pro $\Gamma = 1$

Zobrazení v měřítku 1:1 nedovoluje dosti dobře vykreslit objekty menší než $2R_0$, i když se z hlediska maximálního možného rozlišení mohou tyto objekty v obraze nacházet a takový obraz je třeba zvětšit.

Tyto úvahy platily pro zobrazení v měřítku 1:1. Jestliže změníme měřítko a obraz vektorového rychlostního pole budeme vykreslovat se zvětšením Γ , bude platit

$$\Delta = \Gamma \Delta(\Gamma) \quad (6)$$

kde Δ je velikost pixelu v původním obraze a $\Delta(\Gamma)$ je velikost interpolovaných pixelů ve zvětšeném obraze. Při vykreslování proudnice může být nový krok $ds(\Gamma)$ až Γ krát menší ve srovnání s původním krokem ds , to znamená, že analogicky (3) bude

$$\Delta(\Gamma) = ds(\Gamma) \quad (7)$$

Abychom vykreslili i ty nejmenší reálné detaily, které mohou být v rychlostním poli obsaženy, musíme při vykreslování použít základní zvětšení Γ_0 , kterým změníme R_{lim} na R_0 , to znamená

$$\Gamma_0 = R_0 / R_{lim} \quad (8)$$

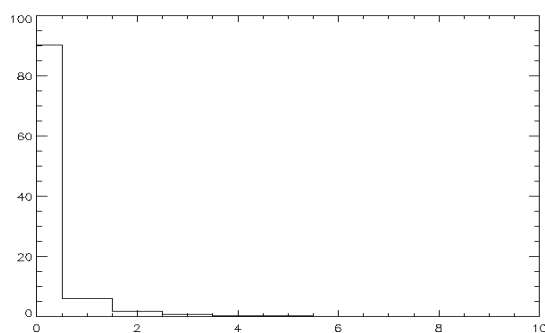
Po dosazení (4) a (5) do (8) dostáváme minimální hodnotu zvětšení $\Gamma_0 \approx 3$, zabezpečující kvalitní zobrazení maximální informace, která může být obsažena ve vykreslovaném vektorovém poli.

Zvětšení $\Gamma = 3$ doporučujeme při vykreslování proudnic použít vždy, pokud nemáme informace o reálném rozlišení vykreslovaných rychlostních polí.

I při větším zvětšení však platí, že proudnice ve zvětšeném obraze budou sice vykresleny jemněji, ale rozlišení topologických struktur zůstane stejné. Nové informace nadměrným zvětšením nezískáme.

4.4 Reálné rozlišení v daném datovém souboru

Ne vždy se prostorové rozlišení zobrazovaného rychlostního pole blíží limitní hranici (2). Reálné rozlišení v daném rychlostním poli můžeme zjistit pomocí histogramu. Pro všechny dvojice sousedících vektorů rychlosti téhož vektorového pole vyhledáme úhly $\delta = 2\alpha$ (viz obr.6) a sestavíme histogram jejich četnosti v závislosti na velikosti úhlu. Z histogramu určíme maximální úhel δ_{max} , který se v rychlostním poli vyskytuje a z něj pak úhel $\alpha_{max} = \delta_{max}/2$.



Obr.8: Histogram úhlů, sestavený pro rychlostní pole A na obr.3. Horizontálně – úhly ve stupních, vertikálně normovaná četnost úhlů (v %). V obraze proudnic se projevuje silná filtrace, protože $\delta_{max} < 6^\circ$

Pokud se δ_{max} blíží hranici 180° , existuje reálné nebezpečí, že datový soubor obsahuje vyšší prostorové frekvence a je nutno provést vhodnou filtraci. Velikost potřebného minimálního zvětšení Γ_{min} pro dosažení správného vykreslení všech reálných detailů, obsažených v konkrétním vektorovém poli získáme tak, že do rovnice (1) dosadíme hodnotu $\alpha = \alpha_{max}$ a vypočteme R . Potřebné minimální zvětšení pro dokonalé vykreslení všech reálných detailů rychlostního pole bude $\Gamma_{min} = R_0/R$, což po dosazení znamená, že

$$\Gamma(\alpha_{max}) = \sqrt{10} \sin \alpha_{max} \quad (5)$$

Z rovnice (5) můžeme zjistit, že minimální zvětšení $\Gamma_{min} = 1$ je vhodné pro úhly do $\alpha_{max} = 18^\circ$, zvětšení $\Gamma_{min} = 2$ pro úhly do $\alpha_{max} = 39^\circ$ a zvětšení $\Gamma_{min} = 3$ je vhodné pro úhly do $\alpha_{max} = 72^\circ$.

Normovaný poloměr $R(\Gamma)_{min}$ minimálního, v daném obraze rychlostního pole reálně existujícího a proudnicemi zobrazeného objektu získáme dosazením $\alpha = \alpha_{max}$ a výrazu (6) do rovnice (1):

$$R(\Gamma)_{min} = \frac{R}{\Delta(\Gamma)} = \frac{\Gamma}{2 \sin \alpha_{max}} \quad (6)$$

Poloměr $R(\Gamma)_{min}$ udává minimální poloměr zakřivení proudučar, případně nejmenších objektů, které můžeme v obraze vektorového rychlostního pole, charakteri-

zvaného histogramovou hodnotou α_{max} při použitím zvětšení Γ lokalizovat. Tento poloměr je uveden v násobcích velikosti pixelu, odpovídajícímu vykreslení tohoto obrazu při použitím zvětšení.

Dosažením $\alpha_{max} = 3$ a $\Gamma = 1$ do (6) dostáváme $R(\Gamma)_{min} = 10$, což při průměru disku cca 1000 pixelů znamená, že nejmenší poloměr zakřivení siločar v obr.3 by měl být asi 0,01 průměru slunečního disku. Jak je vidět, tato hodnota dobře koresponduje s velikostí maximálního zakřivení proudnic v obr.3.

4.5 Volba počátečních bodů

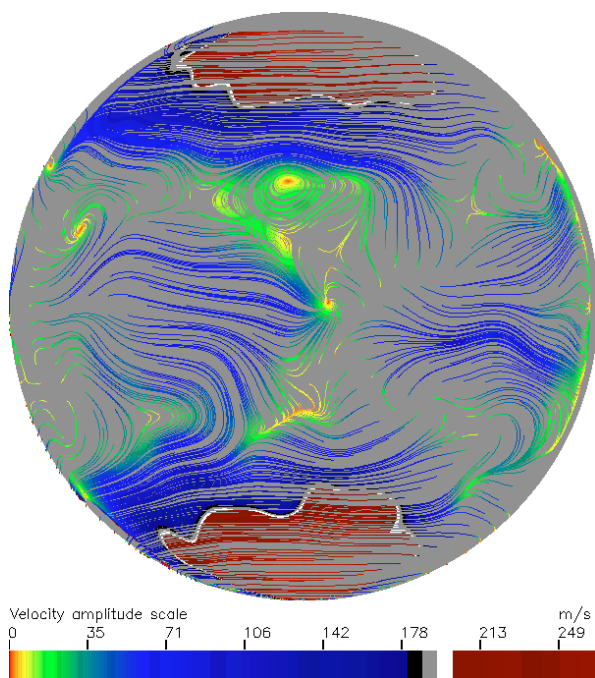
Ve vykreslovaném vektorovém poli je třeba zvolit síť počátečních bodů, z nichž začínáme proudnice vykreslovat. Pokud se v poli proudnic vyskytují ve větší míře horizontální a vertikální směry, není jednoduchá pravidelná síť, orientovaná v těchto směrech, vhodná. Plocha vykreslovaného pole není dostatečně rovnoměrně proudnicemi pokryta. Lepších výsledků dosáhneme použitím Archimedovy spirály. Přibližný vzorec pro výpočet radiusvektoru bodu $i+1$ na spirále bude

$$R_{i+1} = \frac{K}{2\pi}(\alpha_i + \Delta\alpha_i), \quad (6)$$

kde přírůstek úhlu od i -tého bodu k bodu $i+1$, ležícímu na spirále, určíme z výrazu

$$\Delta\alpha_i = \frac{K}{R_i} \quad (7)$$

Body sítě leží na této spirále ve vzdálenosti, která je přibližně rovna stoupání spirály K . Takto pokryjeme rovnoměrně celou plochu a toto rozložení bodů můžeme bez problému kdykoli reprodukovat.

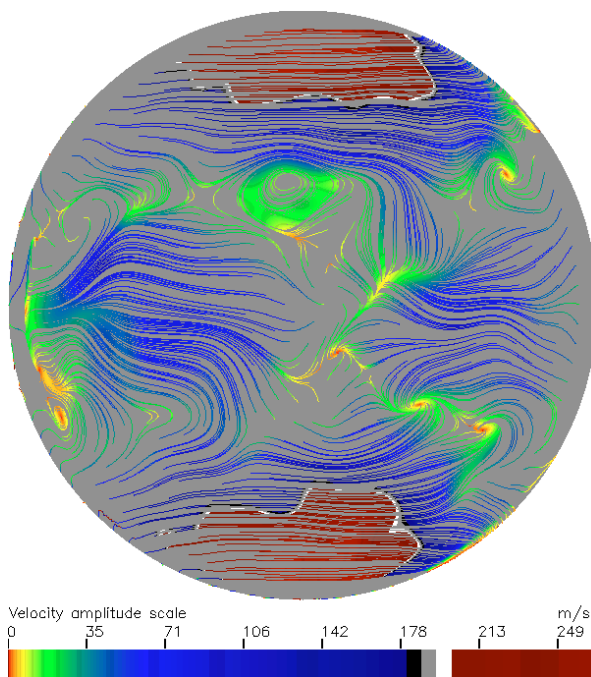


Obr.9: Proudnice rychlostního pole, A vykreslené z bodů sítě po směru vektoru. Proudnice končí ve vtocích.

4.6 Způsob vykreslování proudnic

Proudnice je možno vykreslovat třemi způsoby. Proudnici můžeme kreslit z počátečního bodu sítě ve směru vektorů rychlosti (obr.9) nebo ve směru opačném (obr.10). Podle toho pak budou proudnice končit v místech mizení nebo vyvěrání hmoty.

Pokud chceme vykreslit proudění hmoty od místa vyvěrání hmoty na povrch k místu mizení hmoty pod povrch, kreslíme proudnici z počátečního bodu sítě v obou směrech, tzn. jak ve směru vektoru rychlosti, tak i ve směru opačném. Námí popisovaný algoritmus vykreslování proudnic je pro tento způsob zvláště vhodný, protože v počátečním bodě oba směry na sebe plynule navazují.



Obr.10: Proudnice rychlostního pole A , vykreslené z bodů sítě proti směru vektoru. Proudnice končí ve zdrojích.

4.7 Délka proudnic

Nejjednodušší způsob nastavení délky proudnic je vykreslení zadaného počtu kroků ds . V takovém případě bude mít většina proudnic stejnou délku, což nemusí být na závadu. To platí hlavně u krátkých proudnic s malým počtem kroků.

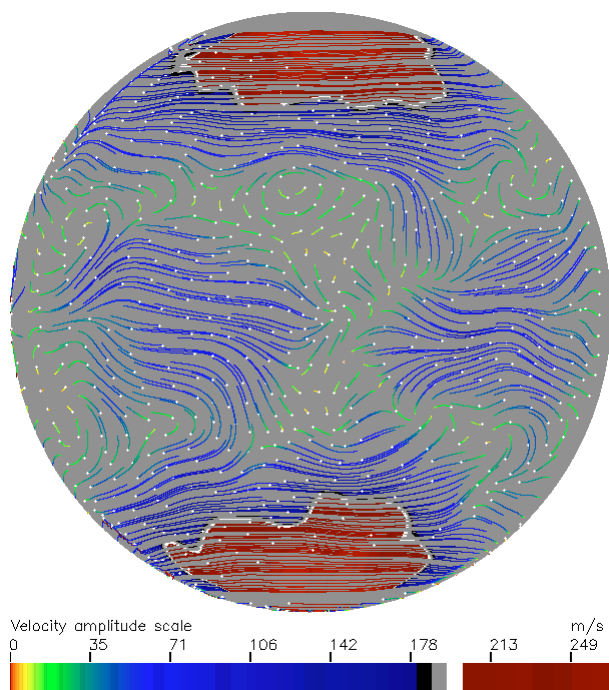
Podle druhého způsobu vykresluje proudnici tak dlouho, pokud rychlost ve vykreslovaném bodě neklesne pod limitní hodnotu (obr.12). Takové proudnice budou různě dlouhé a dobře lokalizují místa vyvěrání hmoty a mizení hmoty pod fotosféru.

Pokud si přejeme tímto algoritmem vykreslovat proudnice proporcionálně amplitudě rychlosti, je třeba nejdříve zjistit maximální amplitudu rychlosti v datovém souboru a krok pro výpočet bodu proudnice, úměrný amplitudě, zvolit tak, aby jeho maximální hodnota nepřekročila stanovený limit

$$dl(\Gamma)_{max} = \Delta(\Gamma) \quad (8)$$

4.8 Orientace proudnic

Obvyklé označení směru proudění šipkami se nám hlavně u hustých systémů proudnic neosvědčilo. Šipky celkový obraz příliš komplikují. Proto jsme konec proudnice, ke kterému proudí hmota, začali označovat velkou tečkou (obr.11). Toto označení působí menší narušení výsledného obrazu. Jinou možností je označení obou konců proudnic dvěma standardními barvami, odlišnými od barevné škály, kterou popisujeme v následujícím bodě.



Obr.11: Proudnice rychlostního pole A, vykreslené z bodů sítě po směru vektoru a zakončené tečkou.

4.9 Škála rychlostí

Tvar proudnic určuje v každém jejím bodě lokální směr proudění hmoty. Barvou těchto bodů můžeme vyjádřit informaci o rychlosti proudění. Používáme dvě škály – lineární a logaritmickou. Lineární škála (obr.13) popisuje rovnoměrněji celý rozsah amplitud rychlostí, logaritmická (všechny zbývající obrazy proudnic) zdůrazňuje struktury s malými rychlostmi. Je možno použít i černobílou škálu, barevná škála je však mnohem výraznější a právě zde se rozdíl mezi lineární a logaritmickou škálou projevuje mnohem výrazněji.

5. OVĚŘENÍ TVARU PROUDNICE

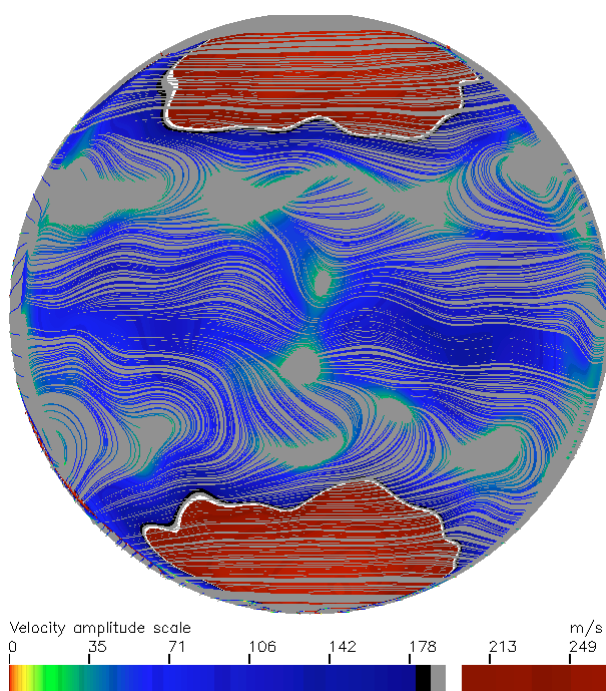
Pro ověření správného tvaru proudnice používáme jednoduchý test. Proudnice vektorového pole vykresluje krokem ds z výchozích bodů sítě ve směru vektorů rychlosti do konečného bodu a obráceným postupem se vracíme zpět. Pokud je vše v pořádku, vrátíme se zpět po téže proudnici. Pokud jsme při návratu vykreslili jinou proudnici, je třeba zmenšit krok ds nebo provést filtraci datového pole.

6. VLASTNOSTI PROUDNIC

Pokud vytvoříme dostatečně hustou síť počátečních bodů a limitní hodnotu pro vykreslování nastavíme dostatečně nízkou, pokryjí proudnice vykreslovanou plochu natolik hustě, že jejich barevná škála vytváří velmi zřetelné struktury amplitud rychlostí (obr.3 a obr.4).

Na rozdíl od rychlostních polí, zobrazených vektory, proudnice zobrazují dráhu pohybu hmoty nezávisle na její rychlosti, to znamená stejně jak v oblastech vysokých, tak i nízkých rychlostí.

Proto mohou být tyto proudnice vykreslovány i v oblastech velmi malých rychlostí, prakticky v oblastech nuly. Zde se již mohou kromě reálných rychlostních polí uplatňovat i efekty, vznikající v důsledku použité metodiky zpracování dat. Barvy, spolu se směry proudnicových systémů, vytvářejí velmi sugestivní struktury. Naše zkušenosti ukazují, že tyto až nebezpečně sugestivní struktury mohou snadno svést na scestí. Je proto velmi důležité ověřit reálnost takto vznikajících struktur a v případě potřeby je některou z výše uvedených metod vykreslování proudnic odstranit například omezením vykreslování proudnic pod limitní hodnotu amplitudy rychlosti, viz obr.12. Můžeme také použít zobrazení rychlostního pole vektory, které rovněž kritické oblasti malých rychlostí nevykreslují.



Obr.12: Proudnice rychlostního pole B, vykreslované z bodů sítě v obou směrech tak dlouho, pokud amplituda rychlosti neklesne pod 15 m/sec..

Proudnice jsou vykreslovány na základě okamžitého stavu lokálních rychlostních polí. Změny těchto polí mají vliv na lokální změny směru proudnic. V důsledku integrace těchto změn během vykreslování vykazují proudnicové systémy rychlé změny topologie ve

velkých oblastech. Proto jsou proudnicové systémy velmi citlivé na lokální změny vykreslovaného vektorového pole. Pro zvýšení reprodukovatelnosti globálních pohybů je třeba tyto lokální změny vektorových rychlostních polí odstranit ještě před vykreslováním proudnic.

7. KROK NUMERICKÝCH VÝPOČTŮ

Krok numerických výpočtů jednotlivých bodů proudnice by měl být takový, aby se zbytečně nepočítaly body, které při daném zvětšení není možno z důvodu konečného počtu bodů vykreslit. Tato podmínka je splněna v případě, že krok pro numerický výpočet bodů proudnice $dl(\Gamma)$ by měl být menší, než maximální možný krok pro vykreslení proudnice $ds(\Gamma)$, což podle (7) znamená, že

$$dl(\Gamma) < \Delta(\Gamma) \quad (9)$$

Tímto způsobem dosáhneme maximální rychlosti při vykreslování proudnic. Pokud se numerický krok blíží kroku vykreslování proudnic, je vhodné ověřit správnost vykreslení proudnic podle bodu 5.

Pokud by byl krok $dl(\Gamma)$ větší, než vzdálenost mezi dvěma sousedními body obrazu, může být vykreslovaná proudnice přerušovaná.

7. VÝSLEDKY

7.1. 2D zobrazování rychlostních polí proudnicemi je velmi názorné a vhodné pro studium morfologických změn rychlostních polí. Je třeba si však uvědomit, že proudnicový systém zobrazuje pohyb hmoty *v daném časovém okamžiku*, který nemusí být totožný *s pohybem hmoty v čase*.

7.2. Proudnice zobrazují dráhu pohybu hmoty nezávisle na její rychlosti, to znamená stejně jak v oblastech vysokých, tak i nízkých rychlostí. Proto mohou být tyto proudnice vykreslovány i v oblastech rychlostí, blízkých se nule.

7.3. V důsledku integrace lokálních změn rychlostních polí vykazují proudnicové systémy rychlé změny topologie ve velkých oblastech. Proto jsou proudnicové systémy velmi citlivým indikátorem lokálních změn vykreslovaného vektorového pole.

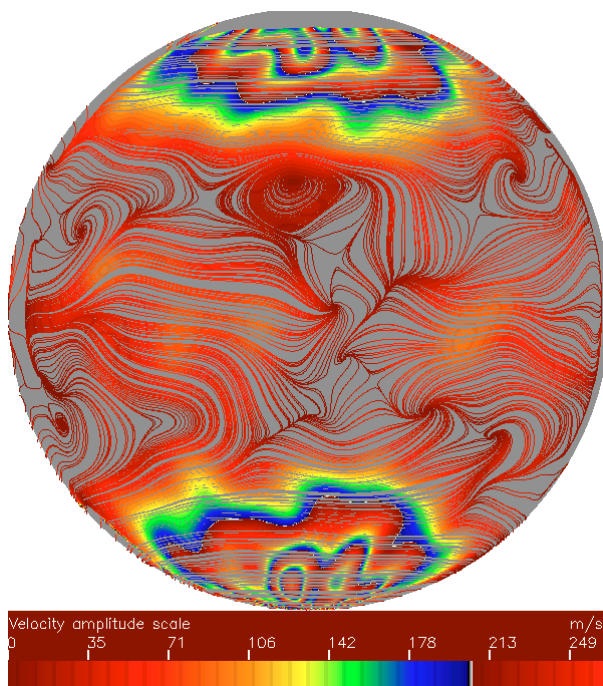
7.4. Ke správnému vykreslení proudnic rychlostního pole, obsahujícího maximální možné prostorové rozlišení, je třeba použít minimálně lineární zvětšení $\Gamma = 3$ (tříkrát větší počet bodů obrazu v řádku ve srovnání s počtem bodů v matici dat).

7.5. Pokud maximální úhel mezi směrnicemi vektorů rychlosti δ_{max} se podle histogramu blíží hranici 180° , existuje reálné nebezpečí, že datový soubor obsahuje vyšší prostorové frekvence a je nutno provést jeho vhodnou filtraci.

7.6. Zvětšení $\Gamma = 1$ je možno beze ztráty informace použít pro vektorová rychlostní pole, jejichž histogram splňuje podmínku $\delta_{max} < 36^\circ$, pro $\Gamma = 2$ platí $\delta_{max} < 78^\circ$ a pro $\Gamma = 3$ má být $\delta_{max} < 144^\circ$.

7.7. Krok pro numerický výpočet bodů proudnice $dl(\Gamma)$ by měl splňovat podmínku (9). Tato podmínka zaručí optimální rychlost výpočtu bodů proudnic a vykreslování proudnic bez jejich přerušení.

7.8. Správnost tvaru vykreslených proudnic ověříme podle bodu 5. tak, že se při jejich vykreslování navrátíme do výchozího bodu.



Obr.13: Proudnice rychlostního pole A , vykreslované z bodů sítě v obou směrech. Je zde však použita lineární škála pro zobrazení amplitudy rychlosti v proudnicích.

Poděkování

Tato práce byla realizována díky účinné podpoře grantového projektu GAČR 205/04/2129 a Klíčového projektu K2043105

LITERATURA:

- Hathaway D.H., Beck J.G., Han S. & Raymond J.: 2002, Sol. Phys., **205**, 25
 Kubičela A.: 1976, Sol. Physics **47**, 551
 Maltby P., Avrett E.H., Carlsson M., Kjeldset-Moe O., Kurucz R.L., Loeser R.: 1986, ApJ **306**, 284
 Simon G.W. & Leighton R.B.: 1964, ApJ, **140**, 1120
 Srikanth R., Singh J. & Raju K.P.: 2000, ApJ, **534**, 1008
 Vernazza J.E., Avrett E.H., Loeser R.: 1981, ApJ Sup. **45**, 635
 Wang H. & Zirin H.: 1989, Sol. Phys., **120**, 1