

Na čem pracujeme: Penumbální zrna v numerické simulaci sluneční skvrny

24.6.2025 - | Astronomický ústav AV ČR

Sluneční skvrny jsou oblastmi na povrchu Slunce s intenzivním magnetickým polem a nižší teplotou než jejich okolí. Zvláště zajímavá je jejich penumbra - světlejší prstenec s vláknitou strukturou, kde se nacházejí penumbální filamenty a na jejich hlavách jasné útvary ve tvaru komety, označované jako penumbální zrna.

Tato zrna představují oblasti horkého plazmatu stoupajícího na povrch, a jejich zdánlivý pohyb směrem ke středu skvrny nebo ven z penumbry je předmětem výzkumu už řadu let. Dlouho bylo známo, že pohyb penumbálních zrn je jen zdánlivý - tedy že neodráží skutečný směr proudění plazmatu, ale spíše komplexní dynamiku v prostředí magnetických polí. Skutečný pohyb plazmatu je striktně ven ze skvrny a obvykle se označuje jako tzv. Evershedův tok.

Pozorování, například ze sondy Hinode nebo teleskopu GREGOR, naznačovala, že směr zdánlivého pohybu penumbálních zrn souvisí s tím, jak je skloněné magnetické pole uvnitř a kolem zrníčka. Pokud je pole uvnitř zrna více horizontální než v okolí, zrno se zdánlivě pohybuje ke středu skvrny, a naopak. Přesto dosud nebylo možné tento vztah s jistotou potvrdit kvůli omezením prostorového a časového rozlišení pozorování. Odpověď by mohla poskytnout detailní numerická simulace.

Takové simulace jsou naštěstí v poslední době k dispozici. Michal Sobotka ze Slunečního oddělení ASU společně s Markusem Schmassmannem z německého KISu využili jednu z nejnovějších, kterou M. Schmassmann vytvořil pomocí kódu MURaM. Cílem bylo zjistit, za jakých fyzikálních podmínek penumbální zrna vznikají, jaké mají vlastnosti, a jak se během života vyvíjejí. Klíčovým bodem bylo zjistit, zda existuje statisticky významný vztah mezi směrem zdánlivého pohybu penumbálních zrn a sklonem magnetického pole uvnitř a v okolí těchto struktur.

V simulaci se zkoumala oblast o rozměrech $49 \times 22 \times 6$ tisíc kilometrů s prostorovým rozlišením 32 km horizontálně a 16 km vertikálně. Simulace probíhala po dobu jedné hodiny s výstupem po 18 sekundách. Hlavními analyzovanými veličinami byly intenzita záření na vlnové délce 500 nm (reprezentující viditelný povrch), teplota, intenzita a sklon magnetického pole a rychlost proudění plazmatu. Penumbální zrna byla automaticky detekována jako jasné oblasti s výrazným stoupajícím proudem.

Ve statistické části bylo analyzováno 226 penumbálních zrn pohybujících se směrem ke středu skvrny a 107 zrn pohybujících se směrem ven. Zkoumala se průměrná hodnota magnetického sklonu uvnitř každého zrna a v jeho okolí. Výsledky ukázaly, že u zrn pohybujících se dovnitř převládá případ, kdy je sklon magnetického pole uvnitř větší (více horizontální) než v okolí, a naopak u skvrn pohybujících se ven bývá sklon menší (více vertikální). Tento výsledek odpovídá pozorováním, ale rozdíly jsou jen mírné a s velkým rozptylem - tedy ne vždy jednoznačně určitelné.

Zajímavý je vývoj těchto rozdílů s rostoucí vzdáleností výskytu zrn od středu skvrny: zatímco vnitřní penumbální zrna mají typicky větší sklon než okolí, ve vnější penumbře je tomu naopak. Změny sklonu se sledovaly nejen na viditelném povrchu, ale i v hloubkách 160 a 320 km pod povrchem. U povrchu bylo zjištěno, že zrna mají vyšší teplotu než okolí, ale rozdíly se s rostoucí hloubkou stírají, což ukazuje, že struktury penumbálních zrn jsou lokalizované relativně blízko povrchu.

Kromě statistiky autoři podrobně analyzovali i jednotlivé případy pomocí svislých řezů a časových

sekvencí. Zjistili, že sklon magnetického pole uvnitř penumbrálního zrn se během jejich života může měnit, a spolu s tím i směr jejich zdánlivého pohybu. Tento poznatek vysvětluje některé dříve pozorované výjimky, kdy směr pohybu zrn neodpovídal předpokládanému vztahu ke sklonu pole. Penumbrální filamenty, v nichž PGs sedí, mají obvykle zvýšený sklon nad povrchem, což koreluje s horizontálním prouděním Evershedova typu.

Simulace dále ukázaly, že pohyb penumbrálních zrn může být ovlivněn turbulencí a náhodnými procesy, zvláště v okrajových oblastech penumbry. V některých případech se směr zdánlivého pohybu během několika minut změnil, nebo zrno úplně zmizelo. Takové změny nelze snadno pozorovat běžnými metodami, protože simulace poskytuje vyšší časové rozlišení než současné spektropolarimetrické přístroje.

Navzdory určitým nedostatkům simulace (například příliš silné magnetické pole ve srovnání s pozorováním nebo nedostatek penumbrálních zrn v oblasti vnitřní penumbry) se ukázalo, že výsledek podporuje základní hypotézu: existuje vztah mezi sklonem magnetického pole v penumbrálních zrnech a jejich směrem pohybu, i když tento vztah je ovlivněn mnoha dalšími faktory a není vždy jednoznačný. Mezi takové faktory patří zejména turbulence v konvekčních proudech a časová proměnlivost struktury zrn.

Autoři rovněž potvrzují, že Evershedův tok – horizontální proudění plazmatu v penumbrálních vláknech – vzniká pouze v oblastech, kde tlak magnetického pole dominuje nad tlakem plynu. Tento poznatek ukazuje na důležitost magnetické konfigurace v generování proudových struktur.

Studie ukazuje, že i když existuje obecný vztah mezi sklonem magnetického pole v penumbrálních zrnech a směrem jejich zdánlivého pohybu, reálné chování těchto struktur je silně ovlivněno dynamikou a turbulencí prostředí. Simulace nabízí pohled do hloubky a do časového vývoje, jaký pozorování zatím neumožňují. Zaplacenou cenou je fakt, že numerické simulace svým vzhledem i hodnotami fyzikálních parametrů ne zcela odpovídají skutečným skvrnám pozorovaným na Slunci. Do budoucna lze očekávat, že kombinace realistických simulací a vysoce přesných pozorování umožní ještě přesněji pochopit vnitřní strukturu a dynamiku slunečních skvrn.

M. Sobotka, M. Schmassmann, *Apparent motion of penumbral grains in a sunspot simulation*, Astronomy and Astrophysics v tisku, preprint arXiv:2506.09504

<https://www.asu.cas.cz/articles/2432/19/na-cem-pracujeme-penumbralni-zrna-v-numericke-simulaci-slunecni-skvrny>