Novinky ve výzkumu slunečních skvrn III

M. Sobotka, Astronomický ústav AV ČR, v.v.i., Ondřejov, ČR, msobotka @asu.cas.cz

Abstrakt

Práce podává přehled nových poznatků o slunečních skvrnách. Zaměřuje se především na pozorování slunečních skvrn s vysokým prostorovým rozlišením v optickém oboru. Ve fotosféře se zabýváme vztahem intensity magnetického pole a jasu ve spojitém spektru, podmínkami vzniku penumbry a nově objevenými magnetickými strukturami v umbře a penumbře. Shrneme také nové poznatky o chromosféře nad skvrnami: umbrální vzplanutí, penumbrální vlny, superpenumbra kolem pór, výtrysky v umbře a penumbře, světelné mosty a stěny. Práce navazuje na přehledové přednášky z 15., 19. a 21. Celoštátného slnečného seminára v letech 2000, 2008 a 2012.

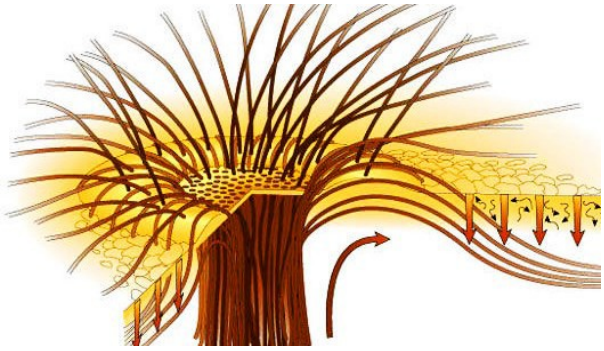
1. ÚVOD

Sluneční skvrny jsou oblasti s velmi silným magnetickým polem, které omezuje konvektivní přenos tepla z podpovrchových vrstev.

Skvrny mají na úrovni fotosféry bohatou a dynamickou strukturu. Vnitřní část skvrny, umbra, je často rozdělena *světelnými mosty* na několik *umbrálních jader*. V umbře pozorujeme velmi malé (100 – 200 km) světlé *umbrální body*. Vnější část skvrny, penumbra, má strukturu tvořenou jasnými a temnými *vlákny*. Podél jasných vláken se pohybují světlá *penumbrální zrna*, která jsou nejvýraznější na hranici s umbrou a dynamicky navazují na *periferní umbrální body*. Oba tyto typy struktur se pohybují horizontálně směrem do umbry rychlostí kolem 500 m/s. Skutečné proudění plynu, Evershedův jev, má směr od umbry, velikost několik km/s a je soustředěno převážně v temných vláknech penumbry. V penumbrálních zrnech a některých umbrálních bodech pozorujeme vzestupné prodění plynu. Malé skvrny, u nichž se nevyvinula penumbra, se nazývají *póry*.

Je důležité si uvědomit, že v penumbře existují dva systémy magnetických silotrubic (Thomas a Weiss 2008, kapitola 5.2). První z nich, který je pokračováním magnetického pole umbry, má malý sklon silotrubic ke kolmici a silné magnetické pole. Dosahuje vysoko do atmosféry Slunce a ve vnitřní penumbře odpovídá temným vláknům. Druhý systém, který je spojen s Evershedovým prouděním, má slabší magnetické pole a hodně nakloněné, téměř vodorovné silotrubice. Tomu odpovídají penumbrální vlákna, která jsou světlá blízko umbry a tmavá dále v penumbře. Tyto dva prolínající se systémy nazýváme *neučesaným magnetickým polem* penumbry (obr. 1).

Numerické simulace slunečních skvrn pomocí magnetohydrodynamického kódu (např. Rempel 2012)



Obr. 1. Neučesaný model magnetického pole v penumbře.

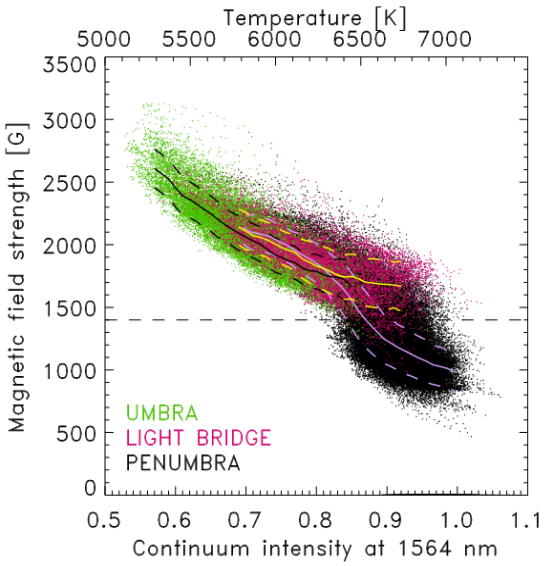
dokážou reprodukovat popsané fotosférické struktury (kromě světelných mostů) s pozoruhodnou věrností.

V chromosféře nad skvrnami stále vidíme umbru, penumbru a světelné mosty. Systém méně nakloněných magnetických silotrubic vytváří v chromosféře rozsáhlou vláknitou strukturu, *superpenumbru*. V ní pozorujeme obrácený Evershedův jev, kdy plyn proudí směrem ke středu skvrny.

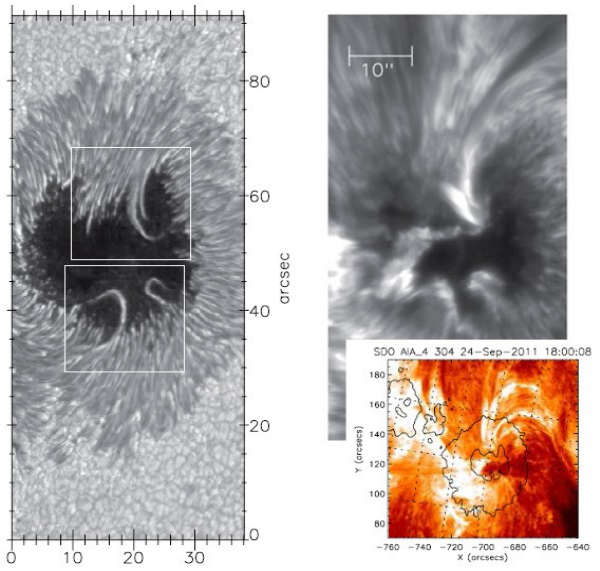
2. SKVRNY VE FOTOSFÉŘE

2.1 Vztah intenzity a magnetického pole

V souladu s teorií by oblasti se silným magnetickým polem měly být temnější a chladnější než oblasti, kde je pole slabší. Tento předpoklad byl a je dlouhodobě ověřován různými pozorováními. Nedávno k tomu byl využit i největší evropský dalekohled GREGOR, který nabízí skvělé prostorové rozlišení a vysokou citlivost při měření magnetického pole v infračervené oblasti kolem λ = 15650 Å, ve které vidíme do nejhlubších vrstev fotosféry.



Obr. 2. Vztah intenzity (teploty) a velikosti magnetického pole v umbře, penumbře a světelných mostech. Plné čáry odpovídají průměrným hodnotám a čárkované standardním odchylkám.



Obr. 3. Umbrální filamenty v kontinuu (vlevo), v chromosféře (vpravo) a související koronální smyčky (vpravo dole). Převzato z Kleint a Sainz Dalda (2013).

Sobotka a Rezaei (2017) pozorovali spektra tří velkých slunečních skvrn a vizuálně oddělili oblasti umbry, světelných mostů a penumbry. Vztahy intenzity v kontinuu (nebo odpovídající jasové teploty) a velikosti vektoru magnetického pole B jsou velmi podobné v umbře, světelných mostech a vnitřní penumbře, zatímco ve vnější penumbře (B < 1400 G) magnetické pole skokem ubývá (obr. 2). To se dá vysvětlit pomocí neučesaného magnetického pole, kde v umbře, mostech a vnitřní penumbře převládá první systém méně nakloněných silotrubic a mechanismy omezující konvektivní přenos energie jsou téměř stejné. Naopak ve vnější penumbře dominují téměř vodorovné silotrubice druhého systému, kde je magnetické pole slabší.

Sobotka a Rezaei (2017) též porovnali výsledky svých pozorování se syntetickými daty získanými ze simulací provedených Rempelem (2012). V syntetických datech jsou teploty nižší a magnetická pole silnější než v pozorování. Rozdíly se dají vysvětlit rozptýleným světlem v atmosféře Země a mnohem vyšším prostorovým rozlišením v simulacích.

2.2 Vznik penumbry: Jurčákovo kritérium

Podmínky formování penumbry kolem skvrn byly dlouho nejasné. Při analýze vektoru magnetického pole na hranici umbry a penumbry z dat získaných družicí Hinode Jurčák (2011) zjistil, že s rostoucí silou pole vzrůstá i jeho sklon k normále. Čím je pole silnější, tím je více vodorovné tak, že svislá složka magnetického vektoru B_z je konstantní. Studium této vlastnosti na mnoha skvrnách různých typů a velikostí (Jurčák et al. 2018) ukázalo, že izočára $B_z = 1867$ G je totožná s intenzitní hranicí mezi umbrou a penumbrou. Tato kritická hodnota B_z nezávisí na velikosti umbry.

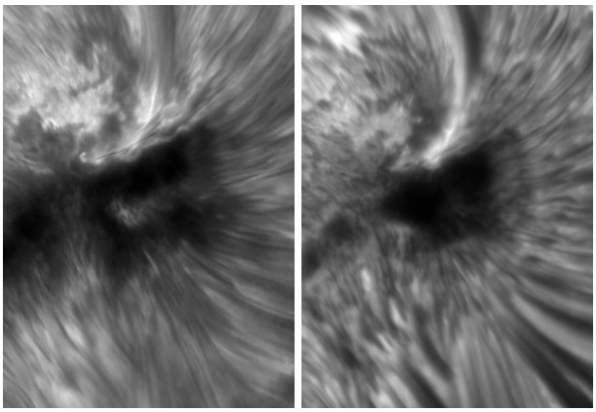
Ke vzniku penumbry je potřeba vytvořit onen druhý systém téměř vodorovných silotrubic. To nastává, když se horké plazma stoupající podél silotrubic prvního systému ochladí vyzařováním, zvýší hustotu a působí na silotrubice svojí vahou (Wentzel 1992). Pokud je svislá složka magnetického pole menší než hodnota Jurčákova kritéria, pole nedokáže vzdorovat váze plazmatu a silotrubice se ohnou do vodorovného směru.

2.3 Umbrální filamenty

Poměrně vzácně se pozorují jasné zakřivené výběžky z penumbry do umbry, *umbrální filamenty* (Kleint a Sainz Dalda 2013; Guglielmino et al. 2017; obr. 3). Od světelných mostů se liší jak silným horizontálním magnetickým polem (2000 G), tak složitou strukturou proudění plazmatu s toky nahoru a dolů, svědčícími o zkrouceném magnetickém poli, nebo s vodorovným prouděním opačným k Evershedovu jevu. Umbrální filamenty silně září i v chromosféře a jsou spojeny s chromosférickými fibrilami a koronálními smyčkami (obr. 3). Předpokládá se, že to jsou fotosférické protějšky svazků koronálních a chromosférických magnetických silotrubic.

3. SKVRNY V CHROMOSFÉŘE A KORÓNĚ

Magnetické pole skvrn zasahuje vysoko do sluneční atmosféry a jeho projevy vidíme v chromosféře, přechodové vrstvě i vnitřní koróně. Chromosféru pozorujeme ze Země nejčastěji v silných spektrálních čarách vodíku (Hα) a ionizovaného vápníku (Ca II H, K a infračervený triplet). Z kosmu vidíme chromosféru



Obr. 4. Chromosféra nad skvrnou, pozorovaná na SST/CRISP, La Palma, 2012. Vlevo: střed čáry Ca II 8542Å. Jasnější oblast uprostřed umbry je umbrální vzplanutí. Vpravo: střed čáry Hα s běžícími penumbrálními vlnami.

v ultrafialové oblasti v čarách ionizovaného hořčíku (Mg II h, k) a také, spolu s přechodovou vrstvou, v pásmech 1330 Å (družice IRIS) a 304 Å (družice SDO). Korónu pozorujeme v daleké ultrafialové oblasti v pásmech družice SDO 171 Å (klidná koróna) a 193, 211 a 335 Å (koróna v aktivních oblastech).

3.1 Oscilace a vlny

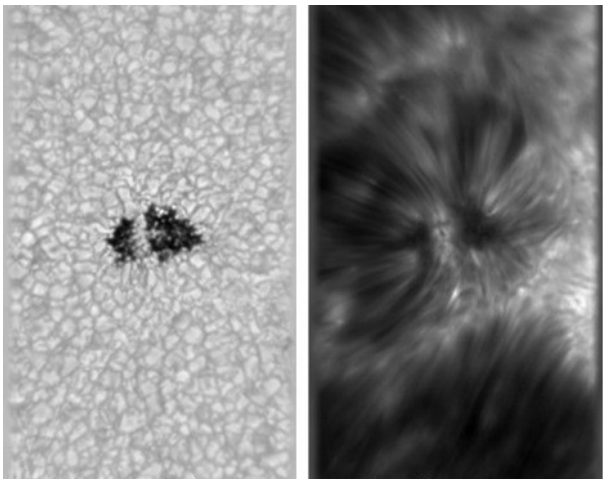
Beckers a Tallant (1969) poprvé popsali *umbrální vzplanutí* (umbral flashes) jako pravidelně se opakující zjasnění části umbry v jádrech silných chromosférických čar (obr. 4). Zjasnění jsou časově korelována se změnami vertikální rychlosti v rozsahu přes 10 km/s (Rouppe van der Voort et al. 2003). Typická perioda vzplanutí je kolem tří minut. Další podrobnosti lze najít v přehledu Bogdan a Judge (2006).

Běžící penumbrální vlny (running penumbral waves) objevil Giovanelli (1972). Šíří se radiálně od umbry až do superpenumbry v podobě tmavých a jasných oblouků rychlostí 10 – 15 km/s (obr. 4).

Oba jevy spolu souvisejí a jsou pravděpodobně způsobeny magnetoakustickými vlnami šířícími se z fotosféry do chromosféry, kde je pozorujeme jako oscilace s periodou tří minut. Při průchodu umbrou způsobují zjasnění a v magnetickém poli penumbry a superpenumbry postupují podél nakloněných siločar, což vyvolává efekt běžících vln (Bloomfield et al. 2007).

3.2 Může mít póra superpenumbru?

Sobotka et al. (2013) pozorovali rozsáhlou vláknitou strukturu v chromosféře kolem póry, připomínající superpenumbru slunečních skvrn. Ukázali, že má nejen strukturu stejnou jako superpenumbra, ale že se jí šíří běžící penumbrální vlny a existuje v ní obrácený Evershedův jev. Protože superpenumbru formuje první systém méně skloněných silotrubic, který zasahuje až do chromosféry, není k jejímu vzniku nutná penumbra a tudíž i póry mohou vytvářet superpenumbru.

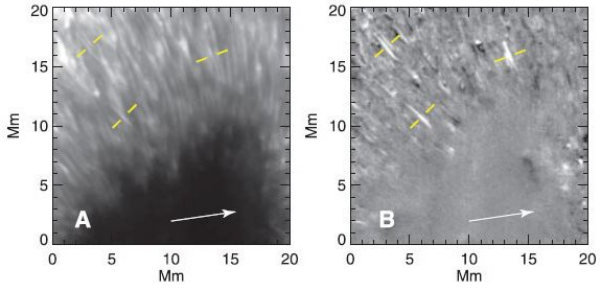


Obr. 5. Póra NOAA 11005 pozorovaná na DST/IBIS, 2008. Vlevo: obraz v bílém světle. Vpravo: střed čáry Ca II 8542 Å, kde vidíme vláknitou strukturu v chromosféře kolem póry.

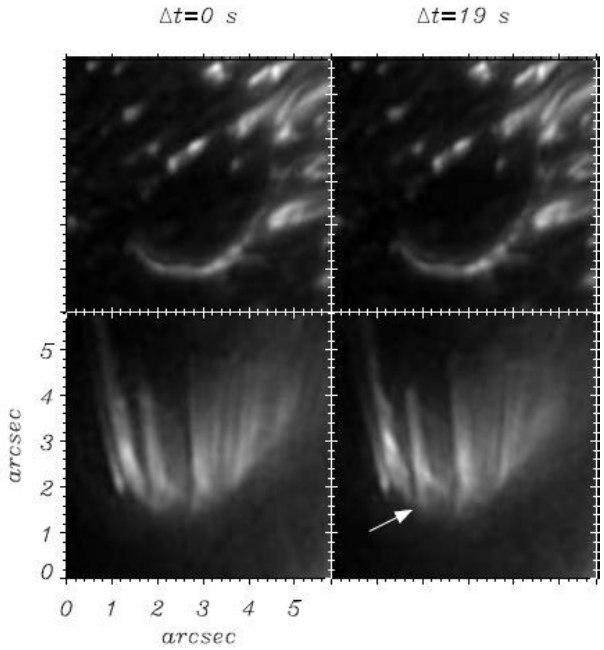
3.3 Mikrovýtrysky nad penumbrou a umbrou

V chromosféře nad penumbrou, v blízkosti jasných penumbrálních zrn, můžeme v čáře ionizovaného vápníku (Ca II H) pozorovat protáhlá (2000 x 400 km) zjasnění, která trvají méně než jednu minutu. V datech družice Hinode je objevil Katsukawa et al. (2007) a nazval *penumbrálními mikrovýtrysky* (penumbral microjets, obr. 6). Jejich původ pravděpodobně souvisí s magnetickou rekonexí, která může nastat v místech, kde se kříží silotrubice dvou různě nakloněných systémů neučesaného magnetického pole.

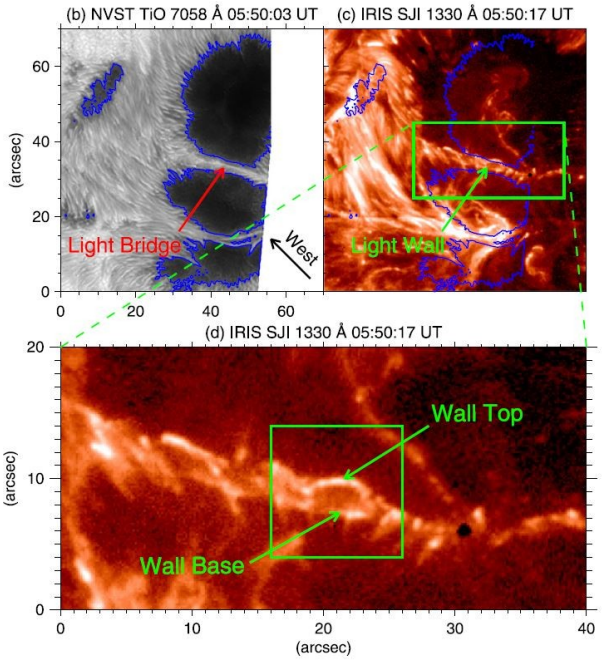
Nad protáhlými výběžky penumbry do umbry byly v čáře Ca II H pozorovány jasné vláknité struktury o rozměrech a životní době podobných penumbrálním mikrovýtryskům (Bharti et al. 2017). Nazývají se *umbrální výtrysky* (umbral jets) a některé z nich se na jednom konci štěpí do tvaru písmene λ (obr. 7). Předpokládá se, že mohou rovněž vznikat v důsledku magnetické rekonexe, tentokrát mezi silně nakloněným polem penumbrálního výběžku a téměř vertikálním polem okolní umbry. Tvar λ naznačuje přítomnost magnetických smyček v oblasti kolem penumbrálního výběžku.



Obr. 6. Penumbrální mikrovýtrysky. A – Penumbra v čáře vápníku Ca II H (Hinode). B – Rozdíl dvou obrazů následujících 30 s po sobě. Bílá šipka označuje směr ke středu disku (Katsukawa et al. 2007).



Obr. 7. Umbrální výtrysky, pozorované na SST, La Palma. Nahoře: penumbrální výběžek v bílém světle. Dole: umbrální výtrysky v chromosféře, v jádru čáry Ca II H. Šipka ukazuje na výtrysk ve tvaru písmene λ (Bharti et al. 2017).



Obr. 8. Světelná stěna. Nahoře vlevo: světelné mosty ve fotosféře. Nahoře vpravo: světelná stěna v chromosféře nad světelným mostem. Dole: detail světelné stěny s vyznačenou základnou a vrcholem (Yang et al. 2015).

3.4 Světelné stěny

Velmi zajímavým jevem jsou *světelné stěny*, jasné struktury pozorované nad světelnými mosty v umbře. Yang et al. (2015) je objevil v sérii snímků pořízených družicí IRIS v pásmu 1330 Å (obr. 8). Světelné stěny mají základnu v příslušných světelných mostech a svojí výškou 3000 až 4000 km zasahují do přechodové vrstvy a koróny, kde jsou vidět v pásmu družice SDO 171 Å.

Typickou vlastností světelných stěn jsou oscilace jejich výšky s amplitudou 1000 km, periodou 4 minuty a rychlostí kolem 15 km/s. Oscilace jsou zřejmě vyvolány magnetoakustickými vlnami šířícími se v magnetickém prostředí z fotosféry do chromosféry a přispívajícími k ohřevu plazmatu ve světelné stěně. Tento způsob ohřevu však nebude jediný, protože ve světelných stěnách se pozorují i nepravidelné výrony plazmatu ukazující na lokální magnetické rekonexe v oblasti světelných mostů (Hou et al. 2017).

4. SHRNUTÍ

V posledních letech byly naše znalosti o slunečních skvrnách výrazně obohaceny díky využití nové generace dalekohledů jak pozemních (SST, GREGOR, NST) tak kosmických (Hinode, SDO, IRIS) a díky pokročilým numerickým simulacím. Významným objevem se stalo Jurčákovo kritérium, které stanovuje kritickou hodnotu svislé složky magnetického pole na hranici umbry a penumbry a potvrzuje výsledky simulací.

V současné době ale stoupá zájem o vyšší vrstvy atmosféry nad skvrnami, které jsou velmi dynamické a prostoupené MHD vlnami různých typů. Objevují se zde nové jevy, mikrovýtrysky a světelné stěny, které zřejmě souvisejí s magnetickou rekonexí. Studium chromosféry a koróny nad skvrnami tak prohlubuje poznání i o komplexních procesech v celých aktivních oblastech.

Poděkování

Práce vznikla za podpory Grantové agentury ČR (grant 18-08097J) a institucionální podpory AV ČR RVO:67985815.

LITERATURA

Beckers, J. M., & Tallant, P. E. 1969, Solar Phys., 7, 351
Bharti, L., et al. 2017, A&A, 597, A127
Bloomfield, D. S., et al. 2007, ApJ, 671, 1005
Bogdan, T. J., & Judge, P. G. 2006, Phil. Trans. R. Soc. A, 364, 313
Giovanelli R. G., 1972, Solar Phys., 27, 71
Guglielmino, S. L., et al. 2017, ApJ, 846:L16
Hou, Y., et al. 2017, ApJ, 848:L9
Jurčák, J. 2011, A&A, 531, A118
Jurčák, J., et al. 2018, A&A, 611, L4
Katsukawa, Y., et al. 2007, Science, 318, 1594
Kleint, L., & Sainz Dalda, A. 2013, ApJ, 770:74
Rempel, M. 2012, ApJ, 750, 62
Rouppe van der Voort, L. H. M., et al. 2003, A&A, 403, 277
Sobotka, M., et al. 2013, A&A, 560, A84
Sobotka, M., & Rezaei, R. 2017, Solar Phys., 292:188
Thomas, J. H., & Weiss, N. O. 2008, Sunspots and Starspots, Cambridge university Press
Wentzel, D. G. 1992, ApJ, 388, 211
Yang, S., et al. 2015, ApJ, 804:L27