

# Slunce – naše (neznámá) nejbližší hvězda

Slunce, naše nejbližší hvězda, pohání téměř veškeré procesy probíhající na Zemi. Závisí na ní jak podnebí, tak i změny teploty a počasí. Spolu s Měsícem se podílí na mořském přílivu a odlivu a napomáhá udržet na zemském povrchu vodu v kapalném stavu. Neúnavně zásobuje povrch naší Země světlem a teplem. Bez energie Slunce by neprobíhala fotosyntéza. Od zdánlivého pohybu Slunce po obloze je odvozován i pravý sluneční čas, jehož upravená hodnota je základem měření času.

Na další zajímavé aspekty našeho Slunce jsme se zeptali vědce a špičkového popularizátora vědy, docenta Michala Švandy z Astronomického ústavu AV ČR.

**Pane docente, zabýváte se sluneční fyzikou, dynamickými procesy ve sluneční atmosféře i jeho podpovrchových vrstvách a také helioseismologií. Jak se vlastně stane, že člověka upoutá právě Slunce?**

„Na gymnáziu v Chotěboři jsem měl obrovskou podporu v třídní učitelce profesorce Marii Menšíkové, která naši třídu učila i matematiku a fyziku, a tak když byl v Astronomickém ústavu (ASU) v Ondřejově den otevřených dveří, s jejím souhlasem jsem se sebral a na vlastní pěst jsem tam vyrazil. Mnoho si nepamatuji, určitě ale rozhovor s dr. Miroslavem Šlechtou, který mě ubezpečoval, že je možné sehnat prázdninovou brigádu na ASU. Napsal jsem tedy dopis s dotazem a ten se interní poštou dostal k dr. Miroslavu Klvaňovi, který vždy na prázdniny šáněl pozorovatele k magnetografu. Mírek o mně projevil zájem a my se domluvili. V té době jsem o Slunci nevěděl skoro nic. Už první prázdniny jsem v Ondřejově strávil více než dva měsíce (plánován byl jeden) a začal se vracet pravidelně, protože mě to zaujalo.“

**Kdy jste se poprvé začal zajímat o astronomii a kdo vás k zájmu o vesmír nasměroval?**

„Obloha mě zajímala už od mala, jistě i pod vlivem seriálu Okna vesmíru dokořán. Vážněji jsem se ale o obor začal zajímat někdy kolem desátého roku poté, co jsem s rodiči navštívil pražské planetárium a odnesl si odtamtud otočnou mapku oblohy. O pár let později jsem dostal k Vánocům i první dalekohled – plastovou stavebnici Astro Cabinet 90. V bezprostředním okolí či v dostupnosti veřejné dopravy bohužel žádná hvězdárna nebyla, takže jsem studoval knihy a dopisoval si s planetáriem. V patnácti jsem se poprvé přihlásil na Expedici na hvězdárnu v Úpici. Tam vše nabralo rychlejší spád.“

**Zdá se, že úpická hvězdárna vás nasměrovala přímo ke Slunci?**

„Na Expedici mě astronomie opravdu zaujala, takže když jsem řešil, co dělat po gymnáziu, byl jsem rozhodnut jít studovat astronomii. Bylo třeba učinit volbu, zda do Prahy nebo do Brna. Volba to nebyla lehká, protože velká část mých přátel z Expedice šla do Brna, kde se kolem hvězdárny formovala velmi aktivní komunita. Přesto jsem šel do Prahy na Univerzitu Karlovu a dodnes jsem přesvědčen, že to byla dobrá volba.“

**Začal jste se zabývat sluneční fyzikou. Jak by podle vás mohla znít základní definice Slunce?**

„Slunce je v první řadě hvězda, a to hvězda nám nejbližší. Bez Slunce by na Zemi nebyl možný život, Země by byla zmrzlá, pustá a temná. Bez velké nadsázky lze tedy Slunce považovat za nejdůležitější objekt Sluneční soustavy.“

**Jaký má Slunce tvar? Přesná koule to není, že? O kolik se liší rovníkový a polární poloměr?**

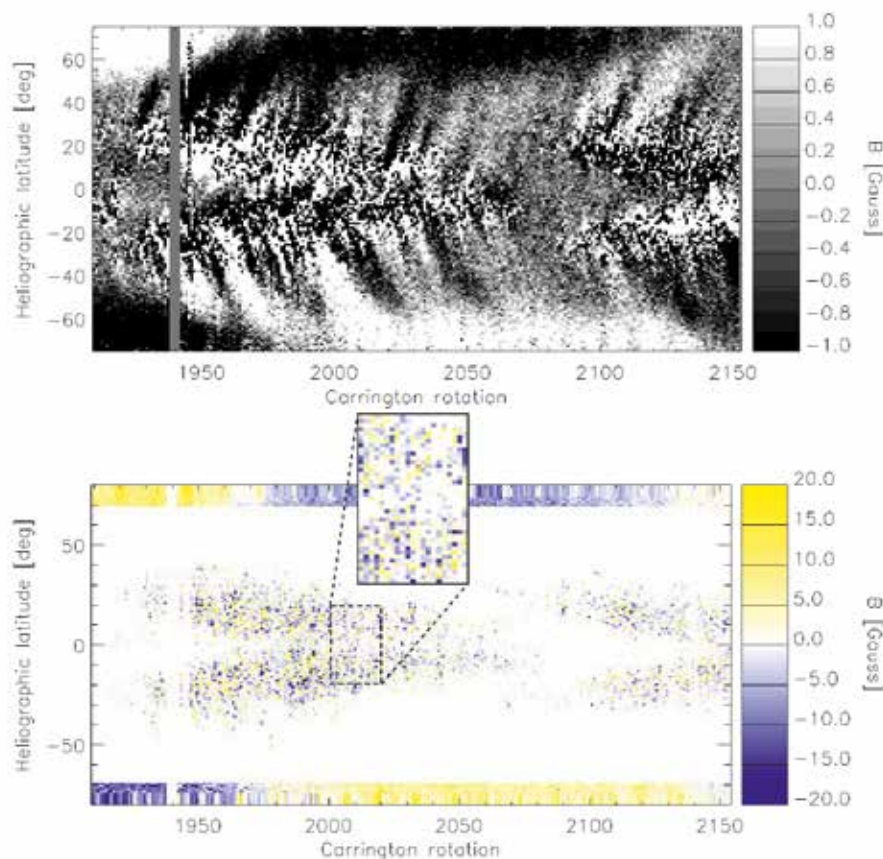
„Stejně jako jiné nebeské objekty rotuje i Slunce. Kolem své osy se otočí přibližně jednou za měsíc. Současně nejde o ideálně tuhé těleso, takže odstředivá síla zplošťuje jeho tvar, který by jinak mohl být ideálně kulový. S ohledem na pomalou rotaci a velikost gravitační síly je však sluneční zploštění malé, v řech čísel jde asi o devět miliontin poloměru, tedy rozdíl mezi (větším) rovníkovým a polárním poloměrem je přibližně šest kilometrů. To se měří nesmírně obtížně, takže pro účely měření slunečního poloměru byly zkonstruovány jednoúčelové přístroje, a některé byly dokonce vypuštěny na oběžnou dráhu. Když už je Slunce zploštělé, znamená to, že má nenulový druhý moment gravitačního pole (tzv.  $J_2$  moment), což ovlivňuje dlouhodobé změny pohybů kosmických těles.“

**Jaký tvar má vnitřní Slunce, které rotuje rychleji než jeho povrch?**

„Vnitřek Slunce nerotuje rychleji než jeho povrch. Rychlost rotace jádra a zářivé vrstvy je něco mezi povrchovou rovníkovou a povrchovou polární rotací. Tyto dvě vrstvy se otáčejí téměř jako tuhé těleso, tedy konstantní úhlovou rychlostí. Téměř fáma o rychlé rotaci nitra pochází z článku Fossata a kol., publikovaného začátkem letošního roku v *Astronomy & Astrophysics*. Tento článek získal velkou popularitu. Již mnohem menší popularitu se v médiích dostalo bezprostředně navazujícím článku od mé bývalé spolupracovnice z mého postdocového pobytu v Německu Hannah Schunker, která tuto analýzu zopakovala a zjistila, že prezentované důkazy a metody jsou přinejmenším nepřesvědčivé. Hannah jednoznačně ukázala, že pokud se z dvanáctileté série měření použitých pro stanovení rychlosti rotace nitra odeberou pouze dvě hodiny pozorování, důkazy o rychlé rotaci zcela zmizí. Výsledek Fossata a kolegů tedy téměř jistě neodpovídá fyzikální realitě a sluneční nitro nerotuje rychleji než povrch.“

**Uprostřed Slunce panuje teplota přes 15 000 000 K. Jaká je však teplota na povrchu?**

„Předně je třeba říci, že Slunce nemá pevný povrch. Je to koule plazmatu – žhavých plynů.“



Obr. č. 1: Motýlkový diagram pór (malých krátce žijících skvrn bez penumbry – dole) v porovnání s motýlkovým diagramem magnetických polí (nahore). Diagram ukazuje, že póry sledují sluneční cyklus. Póry mohly být typickým projevem aktivity ve slabých cyklech (např. během Maunderova minima), kdy cyklus zjevně probíhal, ale skvrny nebyly pozorovány. Póry by byly převážně mimo dosah tehdejších přístrojů.

Působením vlastní gravitace je však výškově rozvrstveno: látka je hustší ve středu a řídne směrem ven, a v určité vzdálenosti od středu nastává situace, kdy hustota látky prudce klesá. Nastanou zde podmínky, při nichž látka pro fotony viditelného záření zprůhlední. Tato hranice je poměrně ostrá, její tloušťka činí kolem tří set kilometrů, což je ve srovnání se slunečním poloměrem 700 000 km opravdový zlomek. Z důvodu této 'ostrosti' pak tuto vrstvu – ve skutečnosti fotosféru, tedy spodní vrstvu atmosféry Slunce – označíme za povrch sluneční koule. Teplota látky zde dosahuje přibližně 6000 K, což je v porovnání s centrální teplotou značný pokles. Celou situaci si lze představit tak, že v jádře Slunce 'hoří' termojaderný reaktor, kde vzniká sluneční svítivost, a ta se pak vnějšími obaly již jen přenáší. Protože však se vzdáleností roste objem koule, objemová hustota energie klesá a látka chladne. Není to zcela přesné, ale pro prvotní představu to postačí.

### Co bychom si měli představit pod pojmem aktivita Slunce?

„Kdyby bylo Slunce klidnou hvězdou, bylo by docela nudné. Naštěstí pro nás astronomy však je sluneční těleso i sluneční atmosféra protkána magnetickými poli, která se koncentrují do větších struktur. Právě v těchto organizovaných strukturách magnetických polí vznikají všechny projevy tzv. aktivity Slunce. Jako aktivitu označujeme všechny jevy, které souvisejí s proměnností magnetického pole. Nejznámějšími projevy jsou sluneční skvrny, nelze však nezmínit ani protuberance, fukulová pole nebo erupce. Dlužno podotknout, že magnetická aktivita není jen doménou našeho Slunce, ale že i jiné hvězdy se projevují podobně. Pak ovšem mluvíme o aktivitě hvězdné.“

**Slunce představuje neuvěřitelných 99,8% hmotnosti Sluneční soustavy, ale pouhá 2%**

### momentu hybnosti. Můžete nám tuto skutečnost objasnit?

„Slunce je skutečně podstatou Sluneční soustavy, co se týče hmotnosti. Moment hybnosti s hmotností sice úzce souvisí, je s ní v přímé úměře, ale stejnou úměrou závisí také na rychlosti a vzdálenosti příslušného tělesa od osi rotace. Zejména vzdálenostní činitel pak pro vzdálené objekty zdaleka převládá. Největší moment hybnosti tak má Jupiter, po Slunci zdaleka nehmotnější těleso, které je přitom relativně daleko od těžiště Sluneční soustavy, přibližně 5 au. Pak následují další obří planety Saturn, Uran a Neptun, které těží z obrovské vzdálenosti, a potom Země, Venuše a Mars, které ve srovnání s dalšími vzdálenými tělesy těží z hmotnosti a vyšší rychlosti. Když se posčítají oběžné momenty těles Sluneční soustavy a porovnájí s rotačním momentem Slunce, skutečně se ukáže, že ve Slunci je jen několik procent momentu hybnosti celé Sluneční soustavy.“

### Sluneční těleso se spolu s atmosférou dělí na několik vrstev. Mohl byste nám přiblížit jeho strukturu?

„Jak již bylo řečeno, díky gravitační síle je Slunce hloubkově rozvrstveno. Směrem do středu sluneční koule narůstá lokální hustota stejně jako tlak, což v důsledku znamená i nárůst teploty. Tento nárůst je ještě podtržen činností termojaderného 'reaktoru' v jádře, neboť zde při teplotě 15,7 milionů stupňů a hustotě 152krát vyšší, než je hustota vody, probíhá termojaderné slučování vodíku na hélium. Jádro zasahuje přibližně do 25 procent slunečního poloměru a plynule přechází ve vrstvu, kde je teplota nižší než teplota, při níž mohou efektivně běžet termojaderné reakce, ale přesto dost vysoká na to, aby bylo husté plazma pro prolétající fotony záření průhled-

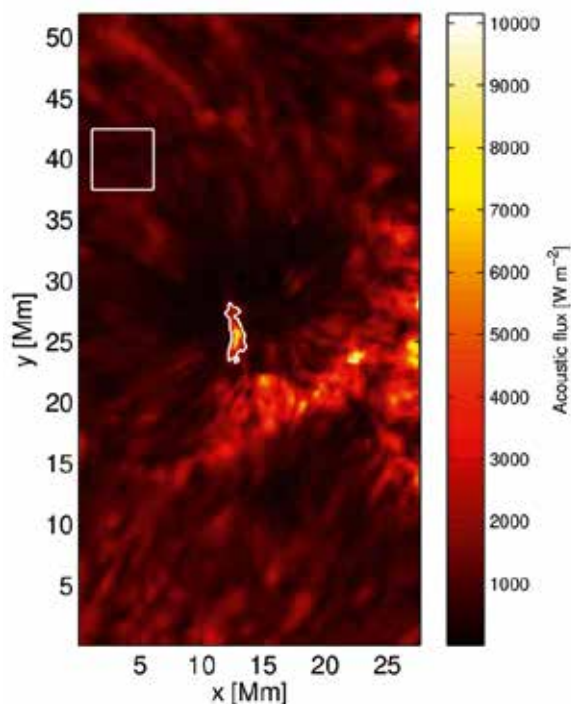


Obr. č. 2: M. Švanda se dlouhodobě věnuje popularizaci vědy.

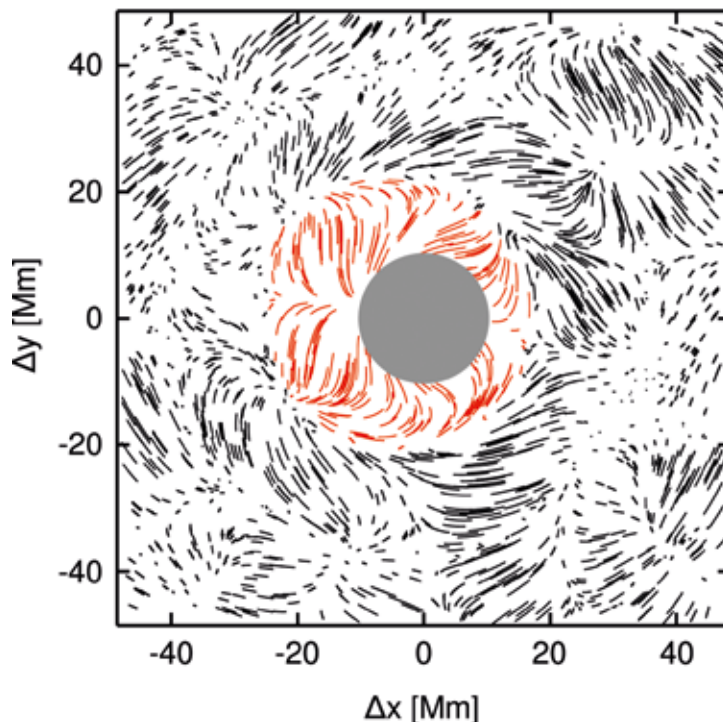
né. V této vrstvě sahající od dvaceti pěti do sedmdesáti procent slunečního poloměru se fotony přenášejí difúzí, neustále se srážejí s částicemi okolité látky, tedy převážně s protony, na nichž se rozptylují. Přibližně na sedmdesáti procentech poloměru však teplota látky poklesne na cca 2,5 milionu K, kdy začínají reorganizovat ionty některých kovů, například železa. Látka díky tomu prudce zneprůhlední, přenos difúzí záření dále není možný, resp. je velmi neefektivní. Až k povrchu se tedy realizuje jiný způsob přenosu, tzv. konvekci, kdy se energie přenáší pohybem společně s látkou. Proto tuto oblast označujeme jako konvektivní zónu. Následuje fotosféra, o níž již byla řeč, nad níž jsou ještě dvě řídké vrstvy sluneční atmosféry, chromosféra a koróna.

### A jaké jsou fyzikální pohyby Slunce, především jeho diferenciální rotace?

„Plazma ve Slunci koná velké množství pohybů. Jednak jde o pohyby do jisté míry stochastické, které mají spojitost s probíhající konvekci. Konvekce je turbulentní jev s náhodnou realizací, přesto lze v konvektivním chaosu nalézt

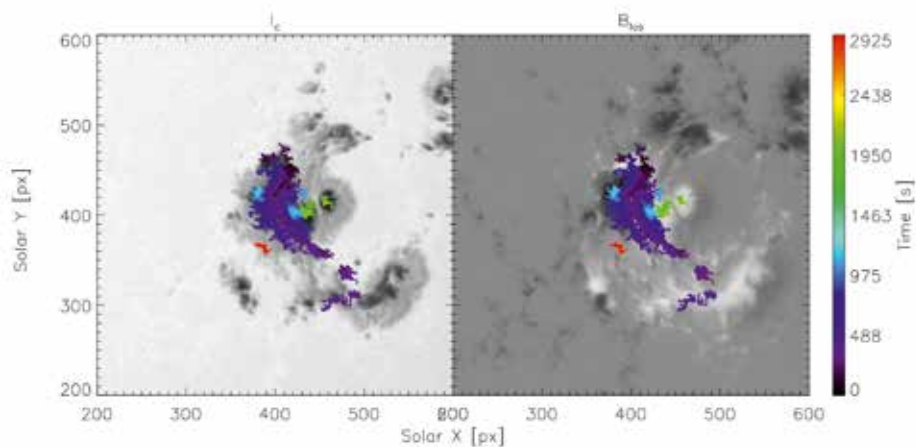


Obr. č. 3: Celkový vypočtený energetický tok modifikovanými akustickými vlnami v chromosféře nad oblastí s pórou a světelným mostem. Zvýšený akustický tok v oblasti světelného mostu plně vysvětluje zvýšené zářivé ztráty v této oblasti.



Obr. č. 4: Proudění v těsném okolí symetrické sluneční skvrny typu H (její pozice je naznačena šedým terčem). Proudnice naznačují, že proudění plazmatu probíhá převážně ve směru od skvrny radiálně ven, je však strháváno vlastním pohybem skvrny vůči okolí a za skvrnou vzniká brázda.





Obr. č. 5: Postup vláken bílé erupce z 6. září 2017 na pozadí intenzitního snímku (vlevo) a magnetogramu (vpravo). Barevný odstín v daném místě odpovídá času po začátku erupce, v němž se zde vlákno nacházelo. Je zřejmé, že vlákna postupovala od rozhraní polarit magnetického pole od sebe, což je v erupcích běžné. Vlákna bílé erupce byla detekována programem napsaným Lucíí Mravcovou, diplomantkou docenta Švandy.

určitou míru organizace. Chaotické konvekční pohyby se například shlukují do jakýchsi buněk. Granulace s buňkami kolem 1000 km velkými je v dobrých dalekohledech vidět i pouhým okem, dále jsou pohyby organizovány do supergranulí s rozměry kolem 30 000 km a buněk a pseudobuněk s jinými rozměry. Konvekce přerozděluje úhlový moment, pohyby jednotlivých 'bublin' jsou ovlivňovány i rotací Slunce, a to působením zejména Coriolisovy síly. Nejen jejím přispěním nerotuje Slunce jako tuhé těleso, ale tzv. diferenciálně. Tedy na rovníku se otáčí rychleji (přibližně s periodou 25 dní, což odpovídá rotační rychlosti necelé 2 km/s), zatímco u pólů pomaleji (přibližně jednou za 34 dní). Diferenciální charakter lze vysledovat v celé konvekční obálce, zatímco zářivé nitro svoji rotaci připomíná spíše tuhé těleso. Aby toho nebylo dost, mohutné proudění odnáší systematicky látku od rovníku k pólům rychlostí asi 20 m/s, látka se pak vrací zpět k rovníku někde v hlubinách konvekční zóny. Toto tzv. meridionální proudění je též důsledkem součinnosti konvekce a rotace. Je zajímavé, že lokální poruchy, například magnetická pole, proudění velmi ovlivňují, a my tak můžeme konstruovat jakési proudnicové mapy, ne nepodobné synoptickým mapám proudění vzduchu v předpovědi počasí. I proto se o takových mapách ve sluneční fyzice říká, že mapují podpovrchové počasí.

#### Které sondy a na jakých úkolech v současné době v blízkosti Slunce pracují?

„Zde bychom mluvili nejspíše o slunečních sondách v libračním bodě  $L_1$  nebo o dvojici sond STEREO na oběžných drahách s poloosou blízkou 1 AU. V blízkosti Slunce nyní pracuje i sonda Parker Solar Probe, v únoru 2020 úspěšně odstartovala Solar Orbiter, na jejíž výsledky se obzvláště těšíme.“

#### Při studiu parametrů Slunce jsem narazila na pojem tachoklina. O co vlastně jde a jaká je její souvislost s družicí SOHO?

„Tachoklina je označení přechodové vrstvy mezi vrstvou v zářivé rovnováze a konvekční zónou. Nalezneme ji tedy přibližně na sedmi desetinách poloměru. Z helioseismických měření víme, že se v této oblasti poměrně prud-

ce mění charakter sluneční rotace, v rozmezí možná několika stovek kilometrů zde pozorujeme velký rychlostní stříh. Domníváme se, že právě zde působením rychlostního stříhu funguje sluneční dynamo, tedy proces, který cyklicky vytváří a přetváří magnetická pole Slunce. Souvislost s družicí SOHO je jen okrajová – právě z analýz pozorování pořízených družicí SOHO byla tachoklina poprvé studována.“

#### O pozitivních účincích Slunce víme poměrně mnoho. Čím naopak může Slunce ovlivnit život na Zemi negativně?

„Silné erupce spojené s výrony hmoty do koróny mohou při správném směřování vyvolávat geomagnetické bouře, které se poji s neblahými vlivy na pozemské infrastrukturu prvky. Na dlouhých vedeních vznikají nežádoucí vysoká napětí, jsou ovlivňovány až destruovány prvky rozvodných sítí, zvýšenou měrou korodují ropovody, je rušeno rádiové spojení i navigace, jsou poškozovány družice na oběžné dráze. V extrémním případě, jaký nastal 1. září 1859 nebo 23. července 2012 (tato erupce směřovala mimo Zemi) by došlo k velmi závažnému poškození těchto prvků a pesimistické dohady mluví o vynuceném dlouhodobém návratu do doby 'predelektrické'. To by obrovsky ovlivnilo celý život západní civilizace. Těmto událostem nelze předejít, cílem je tedy naučit se je předpovídat a následně udělat vše, aby se předešlo největším škodám.“

#### Je známo, kdy a jakým způsobem Slunce zakončí svůj život?

„Slunce je v současné době na hlavní posloupnosti Hertzsprungova-Russelova diagramu, dlouhodobě se tedy prakticky nemění. Postupně však vyčerpává své jaderné palivo v jádře, a v důsledku toho mimo jiné neustále pomalu expanduje. V časové ose se jednotlivé modely mírně liší, v jednotlivých stádiích se však shodují. Za 6,4 miliardy let dojde jaderné palivo v samotném jádře a Slunce se rozepne do stádia rudého obra. Po další přibližně jedné miliardě odhodí v termálních pulzech své vnější obálky a změní se na bílého trpaslíka. Ten pak bude desítky miliard let chladnout, až se z něho stane trpaslík černý. Planetární systémem, přinejmenším jeho vnitřní částí, budou

těmito změnami rozvráceny, a vnitřní planety, včetně Země, pohlceny.“

#### Na jakém vědeckém úkolu nyní pracujete?

„Podařilo se nám získat grant na studium vývoje aktivních oblastí, takže v tomto smyslu jsme začali prohledávat a zpracovávat datové archívy. Cílem je studovat formace a rozpad slunečních skvrn a struktury proudění v nich a jejich okolí. S kolegy z Ondřejova intenzivně vyšetřujeme záznam erupce 6. září 2017 třídy X9.3, tedy nejsilnější erupce 24. cyklu aktivity. Během ní byla zachycena některá velmi unikátní pozorování, která nám zřejmě umožní omezit řadu modelů původu viditelného světla v tzv. bílých erupcích. Celková statistika bílých erupcí je dalším výzkumným projektem, který vedu. K tomu ještě vyhodnocujeme otázku možného vlivu sluneční aktivity na prvky české rozvodné sítě, což je v našich zemích pilotní projekt. Aby toho nebylo málo, tak se podílím na vyhodnocování pozorování proměnné hvězdy beta Canis Minoris a do toho učím, starám se o několik počítačů, vedu studenty a pokouším se popularizovat astrofyziku. Mám dlouhý úkolník a seznam úkolů se nezkracuje.“

#### A který ze svých dosavadních vědeckých výsledků považujete za nejdůležitější?

„Tak na ten ještě stále čekám.“

Jana Žďárská

Kosmologická sekce České astronomické společnosti, Praha

Obrázky pocházejí z vědeckých prací M. Švandy a jeho spolupracovníků zveřejněných v *Astronomy & Astrophysics* (1, 3), *Astrophysical Journal* (4) a *New Astronomy* (5).

#### Doc. Mgr. Michal Švanda, Ph.D. (\*1980)

vystudoval astronomii a astrofyziku na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy, kde též dokončil doktorské studium ve stejném oboru. Zabývá se sluneční fyzikou, zejména dynamickým děním ve sluneční atmosféře, podpovrchových vrstvách a helioseismologií, vztahy Slunce-Země a aktivitou jiných hvězd. Pracuje v Astronomickém ústavu Akademie věd ČR v Ondřejově a v Astronomickém ústavu MFF UK v Praze, kde se v roce 2016 habilitoval. V letech 2009-2011 působil v Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung v Katlenburg-Lindau v Německu.

