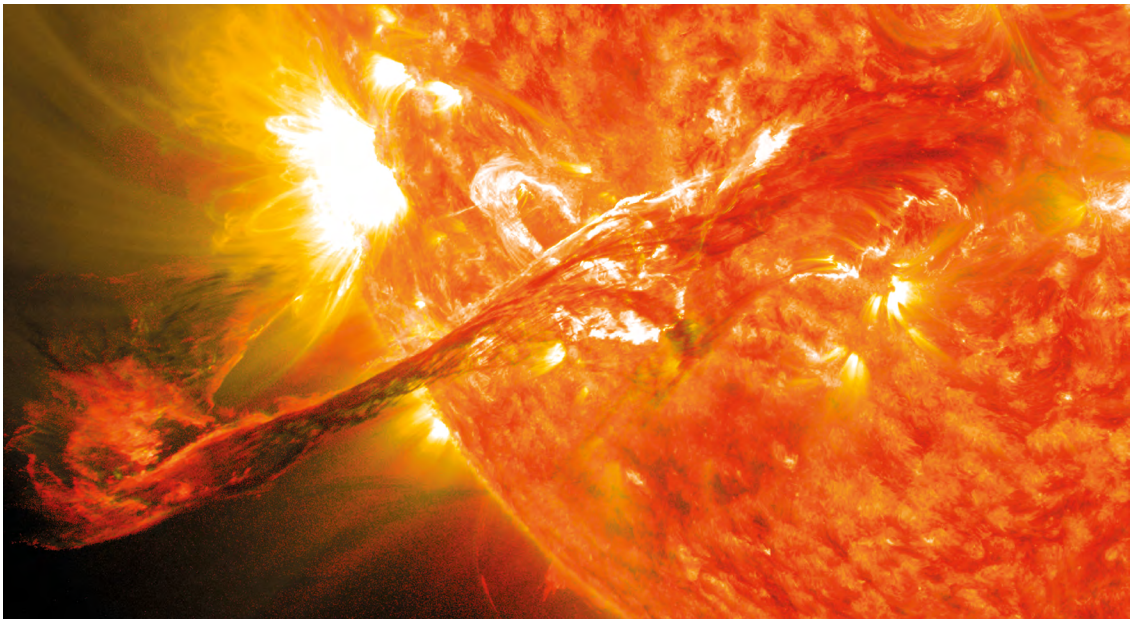
Sluneční erupce jsou jako Fénix z popela

Výzkum klouzavé sluneční rekonexe a důležitých procesů v koróně Slunce

Jana Žďárská

Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 00 Praha 8; zdarskaj@fzu.cz

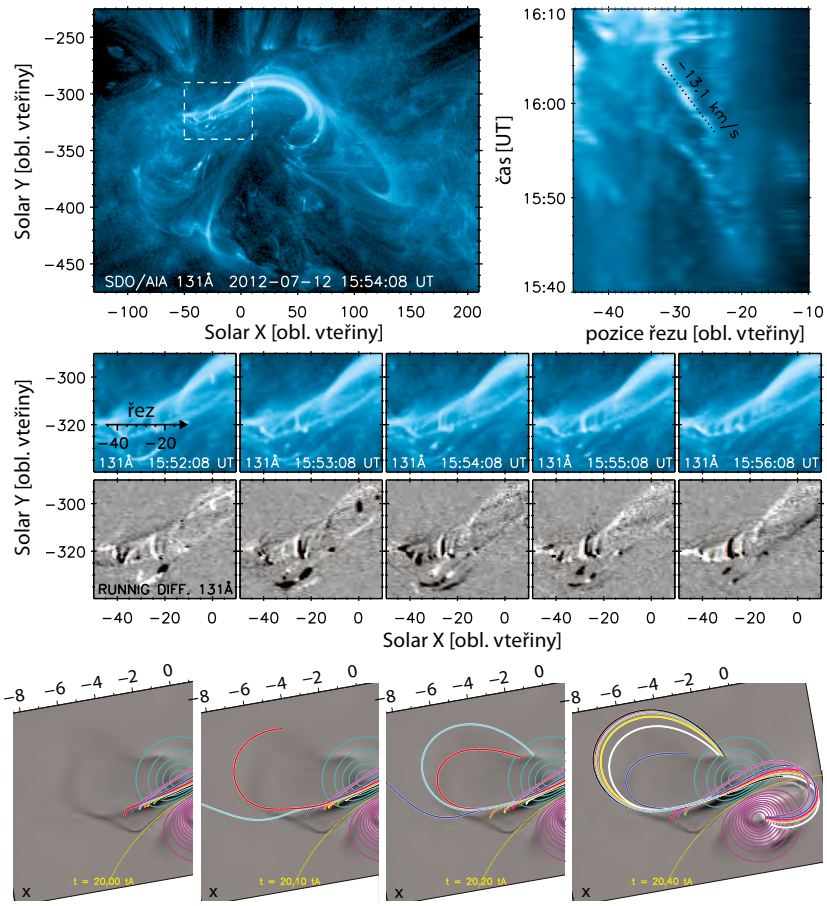
Pro vědce a především sluneční astrofyziky je velmi důležité správně porozumět základním mechanismům probíhajícím na Slunci a jejich vlivu na meziplanetární prostředí včetně Země. *„Pokiaľ chceme predpovedať slnečné erupcie a ich vplyv na medziplanetárne prostredie, vrátane našej technologickej civilizácie, tak si myslím, že to nepôjde bez toho, aby sme porozumeli základným mechanizmom, ktoré v nich prebiehajú,“* připomíná Jaroslav Dudík.



Obr. 1 Eruptivní protuberance ze dne 31. 8. 2012, pozorovaná přístrojem SDO/AIA v kanálech 171 a 304 Ångström, na které tým J. Dudíka studoval projevy 3D rekonexe. *Zdroj: NASA/GSFC a tým přístroje AIA, Creative Commons Attribution 2.0 Generic license*

Sluneční astrofyzik Jaroslav Dudík z Astronomického ústavu AV ČR se zabývá především výzkumem slunečních erupcí pomocí družicových pozorování v extrémní ultrafialové (EUV) oblasti s vysokým časovým a prostorovým rozlišením. Jejich pomocí objevil, že teoreticky předpovězená klouzavá magnetická rekonexe je skutečně mechanismem uvolňování magnetické energie ve slunečních erupcích. *„Študoval som vtedy iný jav, ale rozhodol som sa spracovať všetky dostupné dáta. Keď som z toho spravil animáciu, bolo tam jasne vidno kĺzavú rekonexiu. Okrem toho existuje aj veľmi rýchla kĺzavá rekonexia, takzvaná rýchloklzná. Teoreticky bola predpovedaná už pred dvadsiatimi rokmi. A my sme ju nedávno, po tých dvadsiatich rokoch, konečne našli. Videli sme kĺzanie, ktoré sa deje rýchlosťami, ktoré sú vyššie ako Alfénova rýchlosť. Na túto tému sme napísali v roku 2025 vedecký článok v Nature Astronomy,“* vysvětluje Jaroslav Dudík.

K výzkumu klouzavé rekonexe jsou využívána zejména družicová pozorování v UV a rentgenové oblasti.



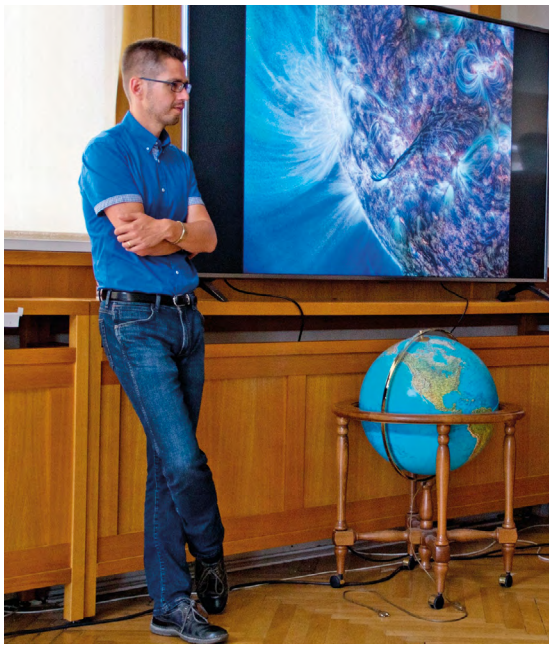
Obr. 2 Klouzavá magnetická rekonexe pozorovaná přístrojem AIA v kanálu 131 Ångström během erupce třídy X ze dne 12. 7. 2012 v porovnání s MHD modelem klouzavé rekonexe. Horkou emisi plazmy s teplotami cca. 10 MK vznikající během erupce vidíme na levém horním panelu. Výřez zobrazuje časový vývoj této emise, přičemž byly pozorovány změny poloh ukotvení jednotlivých erupčních smyček. Tyto klouzavé pohyby jsou zvýrazněny v rozdílových obrázcích (černobílé panely). Časo-prostorový diagram podél černého řezu se nachází na obrázku vpravo nahoře, přičemž je na něm naznačená erupční smyčka klouzající s rychlostí 13,1 km/s. Spodní panely znázorňují simulovaný vývoj rekonektujících magnetických indukčních čar v zobecněném 3D modelu slunečních erupcí. *Převzato z Dudík a kol. (2014), The Astrophysical Journal, 784, 144*

V současnosti funguje několik družic, které pozorují sluneční korónu a erupce v extrémně ultrafialové nebo blízké rentgenové oblasti. Tedy tam, kde koróna a erupce svítí vlastním světlem a kde mají emisní spektrum. Od roku 2010 pracuje ve vesmíru družice NASA Solar Dynamics Observatory (SDO), která má za úkol zkoumat vlivy Slunce na Zemi. V případě této družice je možno říct, že při svém vypuštění určitým způsobem předběhla svou dobu. Družice SDO je výjimečná tím, že každých 12 sekund pořídí snímek Slunce v každém z deseti kanálů s rozlišením více než 4 000 × 4 000 pixelů. Dnes bychom řekli, že rozlišení 4K není už nic neobvyklého. A v případě SDO je to 16K, a to od roku 2010. V každém kanálu, každých 12 sekund. Přitom jeden snímek má desítky megabajtů. Při zpracování erupce, která může trvat i několik hodin, se tak množství pořízených dat pohybuje kolem 50 GB. Přitom rozlišení SDO je takové, že jeden pixel je velký zhruba 400 × 400 km. *„Keď toto vysvetľujem študentom, vravievam, že ak by sme zo vzdialenosti SDO voči Slnku videli Českú republiku, zaberala by polovicu pixelu. Z toho je zrejmé, že nejde o nejaké extrémne veľké rozlíšenie. Napriek tomu to patrí pokrytím Slnka k tomu najlepšiemu, čo v súčasnosti máme,“* připomíná Jaroslav Dudík.

Družice Solar Dynamics Observatory ale není jediná, která se tímto výzkumem zabývá. Další z družic je družice IRIS (*Interface Region Imaging Spectrograph*), která pracuje ve vesmíru od roku 2013 a zaměřuje se na pořizování fotografií a spekter menších oblastí na povrchu Slunce.

IRIS má vyšší prostorové rozlišení a je schopna pořídit snímek každých několik sekund. Pozoruje sice v jiných oblastech spektra než SDO, ale i tak vědci v erupcích vidí, že při tomto lepším prostorovém a časovém rozlišení lze v datech vidět jemnější a dynamičtější strukturu. *„Na jemnosti štruktúry naozaj veľmi záleží, a často býva ešte o dosť menšia, než rozlíši SDO. To sme našli aj v dátach z IRIS. Pozdĺž erupčných vlákien, teda v najjasnejších miestach v erupčnej chromosfére, sa nachádzajú ukotvenia jednotlivých erupčných slučiek. Tie sú čerstvo nahriate, pretože sú tesne po rekonexii, a teda tesne po uvoľnení energie zmenou a uzavretím magnetického poľa. A v týchto ukotveniach existujú malé jasné body, ktoré putujú pozdĺž erupčných vlákien. To nám ukázalo, že modely trojrozmernej rekonexie – teda spôsobu, akým sa magnetické pole prepája do stavu s nižšou energiou, sú skutočne pravdivé, a že sa rekonexia deje práve takýmto spôsobom,“* dodává Jaroslav Dudík.

Rekonexe probíhá vždy ve třech rozměrech – v klasickém dvojrozměrném modelu erupcí se rekonexie děje „rozstřihnutím“ indukčních čar v nulovém bodě a „sešitím“ do stavu s nižší energetickou konfigurací. Ve třech rozměrech tento jev probíhá spojitým způsobem, klouzáním ukotvení magnetických indukčních čar ve třetím rozměru. Stávající sady magnetických indukčních čar si spojitě vyměňují konektivitu, se kterou klouzavá magnetická rekonexe úzce souvisí. *„Konektivita sa dá vysvetliť takto: mám určité miesto v slnečnej atmosfére. Z neho vychádza magnetická indukčná čiara, ktorá končí v inom mieste v slnečnej atmosfére, pretože magnetické pole je vždy uzavreté. A pri rekonexii, čo znamená znovu prepájaní, sa konektivita mení. Dôležité je, že sa mení spojito a to tak, že jednotlivé ukotvenia sa kĺzaním posúvajú proti sebe. Teda si spojito menia miesta, kam sa prepájajú. Povedali by sme, že magnetické pole pri tom akoby tancuje. Tým tancom, tým kĺzaním,*



Obr. 3 Jaroslav Dudík se věnuje i popularizaci vědy – zde během přednášky pro veřejnost ve Slovenském národním muzeu.

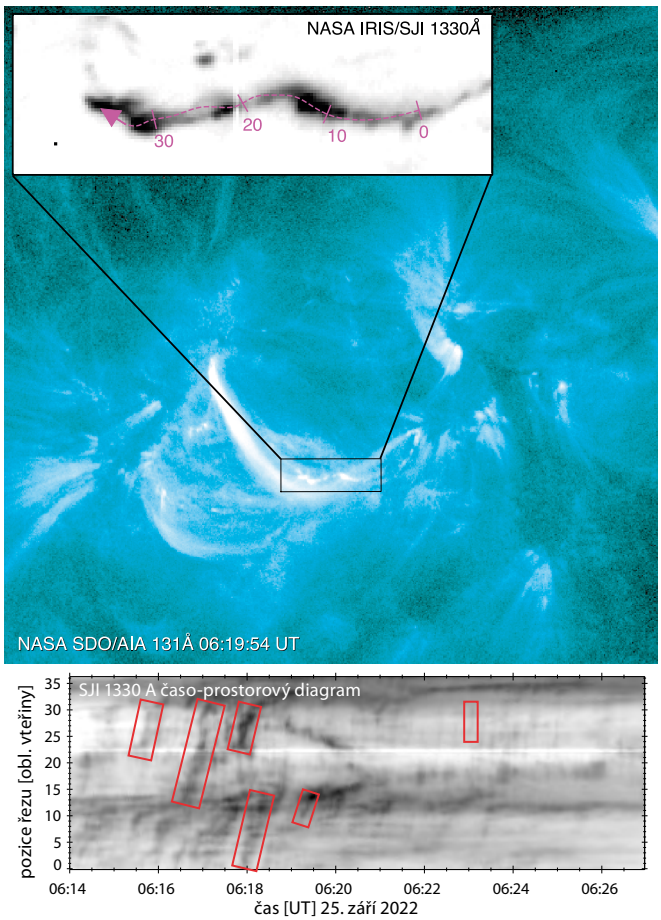
sa dostáva do stavu s menšou energiou, čím sa jeho pôvodná energia uvoľňuje. To vidíme ako slnečnú erupciu, počas ktorej môže byť i časť štruktúry vyvrhnutá von zo slnečnej atmosféry. Tomu hovoríme výron koronálnej hmoty,“ připomíná Jaroslav Dudík.

Zajímavá je skutečnost, jakým způsobem probíhá přenos dat z družic. Družice SDO se pohybuje na geosynchronní dráze a z toho důvodu jí stačí jedna vlastní pozemní stanice s tokem dat 150 Mbit/s. Oproti tomu družice IRIS se pohybuje na polární orbitě, na hranici mezi dnem a nocí. Pohybuje se tak proto, aby stále viděla Slunce. Jeden oblet jí trvá zhruba 90 minut a Země se pod ní otáčí, takže jediná místa, kde lze tato data stahovat, je v blízkosti pólů. Proto se data stahují na Špicberských ostrovech. V této oblasti jsou tzv. radómy, což jsou domy, ve kterých je umístěna rádiová parabolická anténa. Ta se pohybuje, přičemž sleduje družici nad obzorem a při průletu probíhá stahování dat. Celý proces trvá řádově desítky sekund až nižší počet minut. A za tento krátký čas se musí přenos dat stihnout.

Foto: Jana Zdárská

Doc. RNDr. Jaroslav Dudík, PhD., narozen v Banské Štiavnici v roce 1982. Absolvoval Fakultu matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislavě (obor astronomie a astrofyzika v roce 2005, titul Ph.D., poté v roce 2009). V letech 2009–2012 zde byl učitelem a v letech 2015–2018 zde externě přednášel. Absolvoval stáž na Observatoři v Paříži, postdoktorské pobyty pak na Astronomickém ústavu AV ČR a na Univerzitě v Cambridgi. Od r. 2015 působí na Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově, od r. 2022 zde vede skupinu slunečních erupcí a protuberancí. V roce 2017 byl v oboru Fyzika jmenován docentem na Fakultě matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského. Vede nebo vedl studenty bakalářského, magisterského i doktorského studia. Je členem Vědecké rady Akademie věd ČR, zpravodajem Grantové agentury Univerzity Karlovy a v rámci České astronomické společnosti předsedou soutěže Česká astrofotografie měsíce.

Ve své výzkumné činnosti se věnuje primárně sluneční koróně a erupcím – studiu spekter nerovnovážné plazmy a také dynamických projevů trojrozměrné magnetické rekonexe. K tomu využívá zejména družicová pozorování v UV a rentgenové oblasti. V r. 2014 objevil teoreticky předpovězený proces klouzavé magnetické rekonexe ve slunečních erupcích, v r. 2019 se pak podílel na objevu procesů rekonexe ukotvení erupčního magnetického tokového lana. Za svou práci obdržel v r. 2015 Prémii Otto Wichterleho od AV ČR a v r. 2021 čestnou Kopalovou přednášku od České astronomické společnosti. Je autorem nebo spoluautorem více než 60 původních vědeckých prací publikovaných v renomovaných mezinárodních odborných časopisech a také dvou kapitol v odborných monografiích. Podílí se na přípravě návrhů družicových přístrojů pro Evropskou kosmickou agenturu i pro NASA. Ve volném čase se věnuje fotografii, pozorování noční oblohy a ornitologii.



Obr. 4 Pozorování sluneční erupce z 25. 9. 2022, provedené přístrojem AIA na Solar Dynamics Observatory a přístrojem SJI na družici IRIS (inverzní škála šedé). Růžovou barvou je znázorněn řez podél erupčního vlákna. Jednotlivé jasné body klouzají v časoprostorovém řezu (spodní panel).

Základní zpracování stažených dat, které musí být provedeno, je automatické a provádí se počítačově. To znamená, že počítače NASA odečítají šum a udělají tzv. *flat field* – tedy vyrovnání citlivosti. Teprve takto zpracovaný snímek pak NASA pustí do světa. Vědci tak syrová data vlastně ani nedostanou do ruky. To je rozdíl oproti minulosti, kdy vědci obdrželi všechny snímky, tedy i ty temné nebo bez vyrovnání citlivosti, a veškeré potřebné základní úpravy si byli nuceni provádět sami. Ale i v současné éře částečného automatického zpracování dat je třeba občas zkontrolovat celou kalibrační proceduru, aby se ověřilo, že proces probíhá správně.

K potvrzení teoretické předpovědi napomohla mezinárodnímu týmu včetně Jaroslava Dudíka data z družice IRIS. *„Jednalo sa o pozorovania s veľmi rýchlou kadenciou, pri ktorých bola urobená snímka každých 1,8 sekundy. V týchto sme rýchloklznú rekonexiu videli. Ale v pozorovaniach, ktoré boli urobené súčasne pomocou SDO s kadenciou 12 sekúnd, ju vôbec nevidno, pretože pri tejto kadencii nevidno pohyb, iba jeho začiatok a koniec. To je ako keby ste videli bežca iba na začiatku a v cieli. Z toho sa nedá povedať, akým spôsobom a ako rýchlo sa pohyboval. Samozrejme, čím je viac snímok s vyššou kadenciou, tým rastie aj objem dát a taktiež nároky na to, ako ich dostať z kozmického priestoru na Zem,“* dodává Jaroslav Dudík.

Snaha vědců předpovědět sluneční erupce a jejich vliv na meziplanetární prostředí, včetně naší technologické civilizace, jistě nepůjde bez porozumění základním mechanismům, které v nich probíhají. *„Stále sme*

Obr. 5 V roce 2021 obdržel Jaroslav Dudík čestnou Kopalovou přednášku od České astronomické společnosti.

teda v stave, že sa usilujeme o porozumenie základných procesov. A ukazuje sa, že tieto základné procesy okrem iného vytvárajú stočené indukčné čiary, ktoré sú potom súčasťou vyvrhnutej koronálnej hmoty, ale vedú aj k ďalšiemu vývoju tohto magnetického tokového lana," podotýká Jaroslav Dudík.

Pojďme si blíže představit zmiňované magnetické tokové lano. Vypadá to opravdu jako lano, ale ze zkroucených magnetických indukčních čar. Za jistých podmínek, zejména je-li okolní magnetické pole velmi slabé, se toto lano stane nestabilním, rozpíná se a nakonec uletí ze Slunce do prostoru. Během toho je okolní magnetické pole vtahováno do prázdného místa pod unikajícím tokovým lanem. Tam rekonektuje, přičemž část z něj se stává novou součástí již tak nestabilního tokového lana a další část magnetického pole se uzavírá. To je klasický typ rekonexe, který funguje i ve dvou rozměrech.

Tím, že pod tokovým lanem rekonektují nové a nové siločáry, erupční vlákna v jeho ukotvení se rozšiřují a pohybují se směrem od inverzní linie mezi kladnou a zápornou polaritou. *„Aj to najjednoduchšie tokové lano musí mať aspoň dve nohy, teda ukotvenia, jednu v kladnej a jednu v zápornej magnetickej polarite vo fotosfére. Na základe trojrozmerného modelovania sme zistili, že rozširujúce sa erupčné vlákna, pritom ako sa časť koróny pod unikajúcim tokovým lanom uzatvára, postupne vedú k erózii tokového lana zvnútra. Prebiehajúca rekonexia začne akoby požierať tokové lano zvnútra. Zároveň sa tokové lano nabaľuje zvonku, lebo jeho vonkajšia časť rekonektuje s okolitou korónou, ktorá sa stáva jeho súčasťou. To sa môže diať iba v troch rozmeroch, kde je porušená translačná invariancia. Takže sme zistili, že počas erupcie sa tokové lano vlastne celé prebudováva. Vstáva z vlastného popola, ako Fénix. A takéto prebudované tokové lano neskôr priletí k Zemi, kde môže spôsobovať geomagnetické búrky, polárnu žiaru, prípadne môže byť i potenciálne deštruktívne pre elektrické prenosové siete, alebo spôsobovať výpadky rádiokomunikácie a prevádzky lietadiel,"* objasňuje Jaroslav Dudík.

Vědci předpokládají, že celkový magnetický tok, který obsahuje toto tokové lano, se může měnit. Tím, jak se posouvají ukotvení tokového lana během erupce směrem ven z aktivní oblasti, magnetický tok, uzavřený v tokovém laně, může klesat. V rámci vědecké spolupráce na tomto tématu Jaroslav Dudík dlouho spolupracuje s kolegou Guillaumem Aulanierem, který na celý tento jev na základě vlastního modelování přišel. Na základě jeho původního modelu se však pokles magnetického toku nedal přesně předpovědět. Na základě výzkumu jiných kolegů to už jde. *„Moja fyzikálna intuícia tiež vraví, že tomu tak musí byť,"* připomíná Jaroslav Dudík a pokračuje: *„Na začiatku erupcie rastie magnetický tok v tokovom lane rýchlo, ale neskôr už vplyvom iných procesov klesá. Nedávno vyšiel článok našich rakúskych kolegov v Nature Astronomy, ktorí popisujú, ako sa magnetický tok, teda spomínané celkové magnetické pole uzavreté v tokovém lane môže kompletne vymeniť."*

Jaroslav Dudík pochází ze Slovenska. Astronomie mu prostřednictvím hvězdnatého nebe učarovala již jako desetiletému – to když o Vánocích kráčeli ztemnělou zimní krajinou s rodiči k babičce na slavnostní večeři. A láska k noční obloze mu od té doby už zůstala. Na Univerzitě Komenského v Bratislavě vystudoval astronomii spolu s astrofyzikou a také zde vědecky působil a přednášel. Od roku 2015 pracuje na Astronomickém ústavu v České republice, od roku 2022 zde vede skupinu slunečních erupcí a protuberancí. *„Musím povedať, že veda je vždy jedna, svetová. Neexistuje slovenská a česká veda. Ale môžem dodať, že oproti Slovensku je to v Čechách lepšie s financovaním vedy a možnosťami získavania grantov,"* podotýká Jaroslav Dudík. *„Odráža to prístup tých, ktorí vládnu. K tomu, kam chcú krajinu smerovať. Na Slovensku sú politické strany, ktoré vnímali vedu a peniaze na výskum skoro ako príležitosť pre vlastné príjmy. A zároveň, keď sa pozriete, koľko peňazí na vedu sa na Slovensku dávalo v pomere k HDP, tak bolo jasné, že veda nepatrí na Slovensku medzi priority."*

Den co den už miliony let zdraví planetu Zemi Slunce. Obdivuhodná hvězda, na níž je život na Zemi zcela závislý. Již dlouhé zástupy vědců Slunce zkoumali a nadále zkoumají. Proto je i zmiňovaný výzkum klouzavé magnetické rekonexe a tokových lan nadmíru důležitý. To proto, že k Zemi může přiletět vlastně úplně jiné tokové lano, než to, jež vylétlo ze Slunce. Proto je potřeba, aby byl tento proces do výzkumu a následných předpovědí geomagnetických poruch zcela jistě zahrnut. Jen tak budou vědci dělat tyto předpovědi dobře.

Obr. 6 Ve volném čase se věnuje fotografii, pozorování noční oblohy a ornitologii.