



Největší evropský sluneční dalekohled Gregor na Tenerife, v pozadí sopka Teide

Dobrodružná cesta za tajemstvím Slunce

Na studiu Slunce se podílí mnoho vědeckých misí, díky nimž mohou badatelé pozorovat projevy naší hvězdy opravdu ve velkých detailech. O podrobnostech zmíněného výzkumu jsme si povídali se slunečním astrofyzikem Petrem Heinzelem

Ptala se Jana Žďárská

? Astronomii máte od dětství spojenou především s hvězdárnou v Hradci Králové, kde jste prožil mládí a kde jste si také postavil první dalekohled. Vzpomenete si, kterou hvězdu jste s ním poprvé pozoroval?

Žili jsme v činžáku v centru města, o patro níž bydlel kamarád Josef Bartoška. Astronomie nás zajímala oba a společně jsme si stavěli vlastní dalekohledy. Neměli jsme k tomu samozřejmě potřebné profesionální součástky, ale dokázali jsme poměrně dobře improvizovat. V blízké prodejně jsme si vyprosili papírové roury

od koberců a v další ulici jsme zase získali od místního optika brýlová skla. Důležité bylo, že se průměr papírových trubek i brýlové čočky přibližně shodovaly. V trubce jsme potom pilkou vyřízli škvíru a čočku jsme do ní zasunuli. Na druhou stranu jsme umístili okulár z mikroskopu – popravdě ani nevím, kde jsme ho tehdy získali, možná ve škole – a vyrobili jsme si i jeho posouvání, abychom mohli na nebeské objekty správně zaostřit.

Pro lepší stabilitu jsem si pak k tomuto dalekohledu udělal z několika prkének ještě praktický dřevěný stojan. Na střeše našeho

domu byla taková ozdobná kopule a dokola měla malá okénka. Vybrali jsme si ji tedy jako improvizovanou kopuli hvězdárny a mezi odháněním všudypřítomných holubů jsme odtud trpělivě sledovali hvězdnou oblohu. Nejvíc se mi líbilo pozorovat dvojhvězdu Albireo, pátou nejjasnější v souhvězdí Labutě, která je vidět i malým dalekohledem.

? Po ukončení studií na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy jste nastoupil do Slunečního oddělení Astronomického ústavu v Ondřejově. Jak

Kdo je...

Prof. RNDr. Petr Heinzel, DrSc. (*1950)

je astrofyzik se specializací na výzkum atmosféry Slunce a hvězd i aktivních procesů, jež v nich probíhají.

Absolvoval Matematicko-fyzikální fakultu UK a od roku 1976 pracuje v Astronomickém ústavu AV ČR. Zpočátku se spolu s profesorem **Ivanem Hubeným** zabýval teorií rozptýlu záření ve spektrálních čarách, což vedlo

ke vzniku řady významných prací. Jeho zájem se dále orientoval na sluneční erupce, protuberance a obecně na nerovnovážnou teorii přenosu záření a zářivou (magneto)hydrodynamiku. V poslední době se věnuje i výzkumu erupcí na hvězdách.

Stal se autorem několika stovek vědeckých prací, jež dosáhly velkého množství citací. Přednáší teorii hvězdných atmosfér na MFF UK, kde také vedl několik doktorandů. Působil i na řadě ústavů a vysokých škol v zahraničí, v současnosti je zapojen do projektu Centra excelence na univerzitě ve Vratislavi. V letech 2004–2012 stál v čele Astronomického ústavu a byl také dlouholetým vedoucím tamního Slunečního oddělení. Po přijetí Česka do ESA se angažoval v organizování kosmických aktivit na MŠMT a v Akademii věd. **Aktuálně předsedá České astronomické společnosti.** Je ženatý, manželka **Alicja** vystudovala astronomii v polské Toruni. Mají dvě děti.



jestě se cítil na hvězdárně, která je přímou pokračovatelkou té klementinské, založené již v roce 1722?

V Ondřejově jsem pracoval ještě v rámci studií na matfyzu, jako pomocná vědecká síla ve stelárním oddělení u „dvoumetru“ – nyní Perkova dalekohledu. Psal jsem tam i svou diplomovou práci. Po škole jsem dostal nabídku pracovat jako asistent ve Slunečním oddělení, kde jsem později dělal také kandidátskou práci s názvem Rozptýl záření ve spektrálních čarách. Od té doby se tam věnuji především výzkumu Slunce a hvězdných atmosfér.

Víc a víc nových detailů

? Slunce pohání téměř veškeré procesy na Zemi. Závisí na něm podnebí, změny teplot i počasí, zásobuje naši planetu světlem a teplem, bez jeho energie by neprobíhala fotosyntéza. **Co nového o něm víme?**

Na to neexistuje snadná odpověď. I když už dlouhé dekády pozorujeme na Slunci stejné struktury a jevy, stále jim dost dobře nerozumíme. Situace se ještě „komplikuje“ tím, že se v posledních desetiletích výrazně zvýšilo prostorové i časové rozlišení jak pozemních, tak kosmických pozorování.

Sledované struktury vidíme ve velkém detailu, na úrovni několika desítek kilometrů, a jejich vývoj dokážeme detekovat na subsekundových škálách.

Ke Slunci se přiblížila evropská sonda Solar Orbiter a hned její první pozorová-

širokopásmový spektrograf od ultrafialového až po infračervený obor, nebo třeba americký satelit nazvaný MUSE, což bude mnohošterbinový UV spektrograf. Na Havaji rovněž začíná pravidelně pozorovat největší pozemní sluneční daleko-

Každou sekundu se v jádru Slunce přemění asi 600 milionů tun vodíku na helium a při tom se čtyři miliony tun hmoty přemění na energii

ní ukázala velmi malé, ale jasné záblesky v koróně, které vědci nazvali „táborové ohně“. Je to podobné, jako když na velké ploše zapálíte mnoho ohníčků. Nyní se diskutuje o jejich významu pro ohřev koróny, což představuje jeden z těch dosud nepochopených problémů. Neustále se také vyvíjejí nové přístroje, zejména japonská družice Solar-C, která ponese

hled DKIST o průměru čtyř metrů. Díky všem těmto zařízením vidíme na naší hvězdě stále víc a víc nových detailů, což nás jako sluneční astrofyziky velmi těší a zároveň motivuje.

Putování světla na povrch

? Slunce představuje kouli žhavého plazmatu. **Jedná se o hvězdu hlavní**

posloupnosti spektrální třídy G2V, tedy o žlutého trpaslíka. Jaké procesy v něm probíhají?

Každou sekundu se v jeho jádru přemění zhruba šest set milionů tun vodíku na helium a při daném procesu se čtyři miliony tun hmoty přemění na energii. Zářivý výkon Slunce dosahuje téměř 4×10^{26} wattů, z čehož na Zemi dopadá asi 0,45 miliardtiny. Každou sekundu Slunce opustí okolo milionu tun hmoty.

? Díky gravitační síle je naše hvězda hloubkově rozvrstvená. Můžete nám přiblížit její strukturu?

Směrem do středu narůstá lokální hustota, stejně jako tlak. Daný nárůst ještě pod-

Přenos záření difuzí není dost dobře možný, respektive je velmi neefektivní. Až k povrchu se tedy realizuje takzvaná konvekce, kdy se tepelná energie přenáší pohybem společně s látkou. Proto zmíněnou oblast označujeme jako konvektivní zónu.

? Ve vrstvách ležících nad ní se pak odehrávají právě děje, jež se svými kolegy ve Slunečním oddělení zkoumáte. O které vrstvy se jedná?

Jedná se o fotosféru, chromosféru a korónu. Fotosféru sledujeme jako žlutý povrch Slunce viditelný pouhými očima – odtud se odvozuje i pojem „žlutý trpaslík“, s povrchovou teplotou 5 778 kelvinů. Ve fotosféře lze pozorovat vrcholky proudů

heliosféry, tedy do oblasti v okolí Slunce. Coby velmi řídká vrstva je však pozorovatelná jen při úplném zatmění Slunce nebo pomocí koronografů.

Proměnlivé sluneční počasí

? Naše hvězda má velmi komplikované a nestabilní magnetické pole. Spočívá příčina její aktivity právě v něm?

Sluneční těleso i atmosféra jsou doslova protkány magnetickými poli, která se koncentrují do větších organizovaných struktur. A právě v nich skutečně vznikají všechny projevy takzvané sluneční aktivity, k nimž patří skvrny a erupce, protuberance i v posledních desetiletích hojně studované výrony koronální hmoty. Kromě takto vyvržených nabitých částic opouští Slunce také víceméně stacionární proud plazmatu, který označujeme jako sluneční vítr.

? Co všechno bychom si tedy mohli pod pojmem „sluneční aktivita“ představit?

Jde o komplex dynamických jevů, jež se vyskytují ve sluneční atmosféře nebo těsně pod ní a jsou důsledkem vývoje, ale i náhlých změn magnetického pole. Globální variace magnetických polí u povrchu hvězdy mají cyklický charakter, se známou periodou sluneční činnosti zhruba v délce jedenácti let. Nejvýraznějším projevem sluneční aktivity je počet skvrn a ten se právě během uvedené periody mění.

? Projevy sluneční aktivity v heliosféře se označují jako kosmické počasí. Jak mohou ovlivnit život na Zemi?

Termojaderná fúze v jádru Slunce probíhá při teplotě 15,7 milionu stupňů a při hustotě plynu 152krát přesahující hustotu vody

trhuje činnost termojaderného reaktoru v jádru, neboť tam při teplotě 15,7 milionu stupňů a při hustotě 152krát převyšující hustotu vody probíhá slučování vodíku na helium – neboli termojaderná fúze. Jádro zasahuje přibližně do pětadvaceti procent slunečního poloměru a plynule přechází ve vrstvu s nižší teplotou, než za jaké se mohou účinně odehrávat termojaderné reakce. Ve zmíněné vrstvě sahající od pětadvaceti do sedmdesáti procent slunečního poloměru se fotony přenášejí difuzí, neustále se srážejí s částicemi látky, na nichž se rozptylují, a popsáný přenos směrem k povrchu hvězdy trvá asi sto sedmdesát tisíc let. Kdyby dnes jaderné reakce vyhasly, Slunce by nás ještě celou uvedenou dobu zásobilo energií.

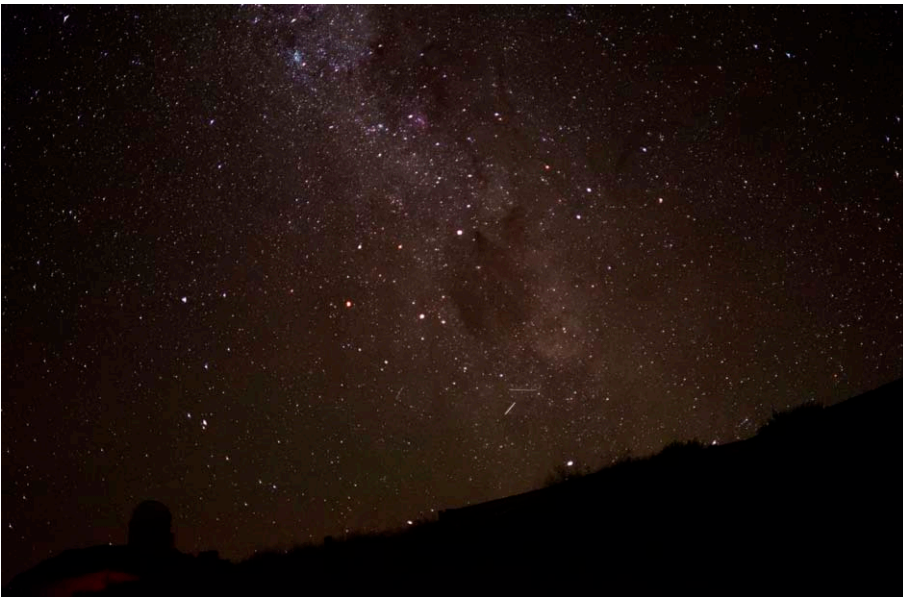
? Přibližně na hranici sedmdesáti procent poloměru však teplota látky klesne pod dva miliony stupňů. Co se poté děje?

V danou chvíli tam začínají rekombinovat ionty některých kovů, například železa.

vystupujících z konvektivní zóny, takzvané granulace, a hlavně sluneční skvrny. Chromosféra pak tvoří vyšší, ale poměrně řídkou vrstvu silně ionizovaného plazmatu. A poslední část sluneční atmosféry představuje koróna. Ta již nemá viditelnou vnější hranici a rozprostírá se daleko do



Zatmění Slunce v americkém státě Idaho v roce 2017, na fotografii Petra Heinzela



Mléčná dráha nad observatoří ESO La Silla v Chile

abychom se vyhnuli největším škodám. Prognózy sluneční aktivity jsou dnes do jisté míry možné a pravidelně je děláme i v Ondřejově.

Solar Orbiter: Blíž než Merkur

? V rámci ESA se českým vědcům podařilo zapojit do velkých evropských projektů výzkumu Slunce, a to Solar Orbiter a PROBA-3. První zmíněná sonda byla vypuštěna v únoru 2020 a má za úkol komplexně studovat Slunce i vnitřní heliosféru z bezprostřední blízkosti. Na jakou vzdálenost se k naší hvězdě dostane?

Mohou způsobit geomagnetické bouře, polární záře, ale i poruchy různých našich infrastruktur. ESA na svých stránkách průběžně zveřejňuje data a důležité informace týkající se kosmického počasí, které jsou určeny pro ochranu před jeho vlivy. Na jejich přípravě se podílí i sluneční patrola Astronomického ústavu Akademie věd. Díky tomu lze včas přijmout ochranná opatření.

Pozor na erupce

? Čím se zabývá fyzika slunečních erupcí, které se dlouhodobě věnujete?

Zkoumáme eruptivní procesy z hlediska fyziky plazmatu. Zajímá nás jednak primární proces uvolnění energie při takzvané rekonexi složitých magnetických polí a dále procesy přenosu zmíněné energie do hlubších vrstev sluneční atmosféry i směrem ven od Slunce, což významně ovlivňuje heliosféru včetně naší planety. Během erupcí detekujeme výrazně zvýšenou emisi nejen částic, ale také záření v celém rozsahu elektromagnetického spektra. V Ondřejově dlouhodobě pozorujeme záření v optickém a rádiovém oboru, ale podílíme se rovněž na pozorováních v rentgenové a ultrafialové oblasti.

? Jak spolu souvisejí sluneční protuberance a erupce?

Protuberance představují jakási oblaka chladného plazmatu řádově o teplotě deseti tisíc kelvinů, které zkondenzovalo v horké koróně a izoluje ho od ní magnetické pole. Dané pole také „udržuje“ zmíněná chladná a hustá oblaka vysoko v horké a řídké koróně proti působení gravitace.

Nejvýraznější projev sluneční aktivity představuje počet skvrn, který se mění v průběhu jedenáctileté periody

Protuberance tvoří krásné útvary viditelné v koróně i mimo zatmění, ale jsou k tomu potřeba speciální úzkopásmové spektrální filtry. Magnetické pole, které je drží, se však může po čase destabilizovat, načež je protuberance vyvržena vysoko do koróny a dál do heliosféry. Obvykle se jedná o počátek erupce: Siločáry pole „vytažené“ do koróny se postupně propojují – dochází k rekonexi – což je zdrojem erupční energie.

? Slunce má na Zemi nejen pozitivní, ale i negativní vliv – to když ji zasáhne jeho silné erupce, často spojené s výrony hmoty do koróny. Jak moc mohou poznamenat náš život či infrastrukturu?

Značně. Na dlouhých vedeních vznikají nežádoucí vysoká napětí, což ovlivňuje, nebo až destruuje prvky rozvodných sítí. Zvýšenou měrou korodují ropovody, dochází k rušení rádiového spojení či navigace, k poškození družic na oběžné dráze, často se mluví i o vlivech na člověka. Vůbec první erupci se podařilo detekovat 1. září 1859 a ukázalo se, že byla velmi silná a způsobila například poruchy telegrafických přenosů. Popsaným událostem nelze předejít: Cílem je tedy naučit se je předpovídat a následně udělat vše,

Solar Orbiter k ní bude opravdu blízko. Každého půl roku, což odpovídá oběžné době sondy kolem Slunce, se má přiblížit až na vzdálenost asi šedesáti slunečních poloměrů – tedy blíž, než krouží Merkur. Pomocí opakovaných průletů kolem Venuše se bude sklon její oběžné dráhy k ekliptice postupně zvětšovat až zhruba na třicet stupňů. Sonda tak získá světové prvenství unikátním pozorováním oblastí kolem slunečních pólů, se současným měřením vlastností prostředí, kterým

» fakta

FASCINUJÍCÍ ZATMĚNÍ

Jde vlastně o velkou náhodu, že se zdánlivý průměr disku naší hvězdy a přirozeného satelitu na obloze prakticky shoduje. Sluneční zatmění nastává, když Měsíc vstoupí mezi Zemi a Slunce, takže jej částečně nebo zcela zakryje. Podle toho pak zatmění dělíme na částečné či úplné, přičemž ve druhém případě se v tzv. pásu totality, který je případně znám, na několik minut trvání úkazu výrazně setmí a ochladí.

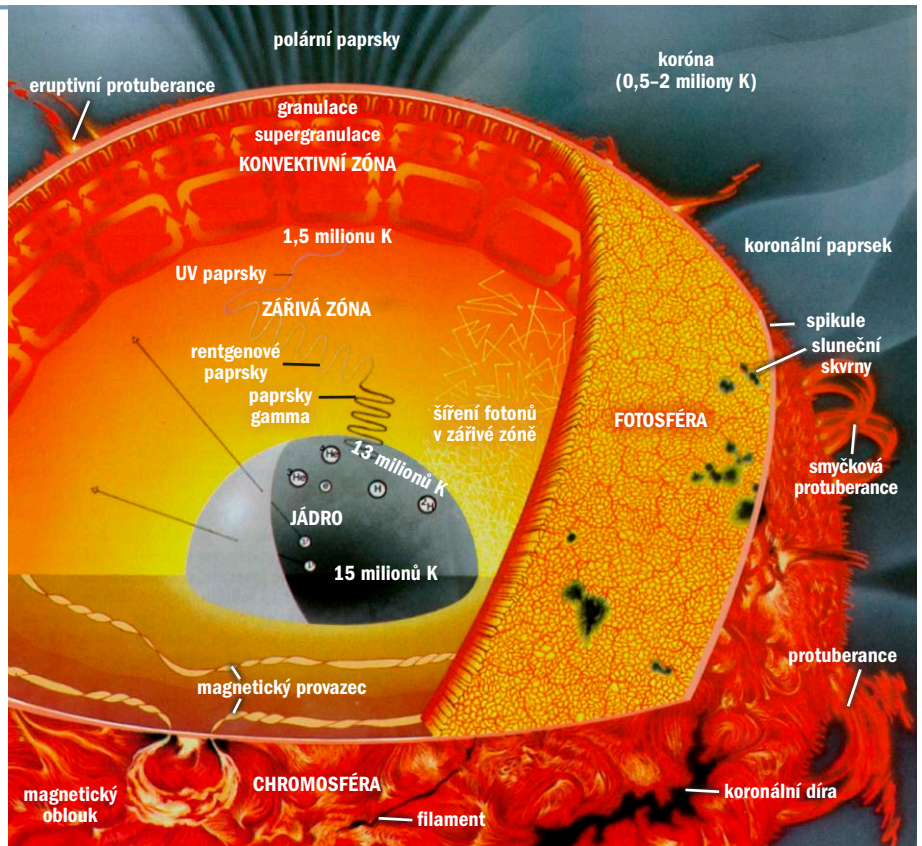
Vnitřní stavba Slunce, struktura jeho atmosféry a projevy sluneční aktivity

bude prolétat. V okamžicích největšího přiblížení bude muset odolávat třináctkrát většímu toku slunečního záření ve srovnání s tokem dopadajícím na Zemi a čelit teplotám až pěti set stupňů.

? Hlavním cílem mise je pochopit aktivní procesy probíhající na Slunci. Jaké odpovědi by díky ní měli získat sluneční astrofyzici?

Dílčích výzkumných cílů existuje několik, ale jednotící prvek tvoří lepší pochopení procesů sluneční aktivity a jejich působení na heliosféru a v konečném důsledku i na Zemi. Dostáváme se tak zpět ke kosmickému počasí, ale Solar Orbiter nemá pravidelně monitorovat sluneční aktivitu, nýbrž přispět k pochopení jednotlivých procesů. Z deseti přístrojů, které nese, je šest takzvaných remote-sensing zařízení a jde v podstatě o dalekohledy pro vzdálené monitorování povrchu Slunce. Čtyři detektory pak slouží pro takzvané in-situ měření lokálních charakteristik plazmatu a elektromagnetických polí při průletu heliosférou. Jedná se o náročný výzkumný úkol, ale pokud se vše zdaří, získáme skutečně důležité, či dokonce přelomové informace.

? Pozorování sluneční koróny má mnohá omezení a ze Země se dá uskutečnit zpravidla jen při úplném slunečním zatmění. Koronograf umístě-



její intenzita musí převyšovat sluneční záření rozptýlené v zemské atmosféře. Výhoda kosmického koronografu tkví primárně v umístění mimo atmosféru Země, takže lze sledovat celou korónu, podobně jako při zatmění. Oproti běžnému trvání zatmění v délce několika minut však může koronograf ve vesmíru pracovat nepřetržitě, tudíž poskytuje data o časovém vývoji

nikoliv jako součást nějakého vědeckého týmu. A pocity? Takřka nesdělitelné... Nejprve se pomalu stmívá, jak Měsíc postupně zakrývá sluneční disk, začíná se ochlazovat a lze sledovat i neobvyklé reakce zvířat. Pak najednou dojde k úplnému zakrytí Slunce a zároveň koróna náhle úplně vyletí: Rozzáří se, jsou vidět struktury koronálního plazmatu a protuberance. Jedná se o velmi kratičký úkaz, ale o to intenzivnější.

Při největším přiblížení bude muset Solar Orbiter odolávat 13krát většímu toku slunečního záření než na Zemi a čelit teplotám až 500 °C

ný na vesmírné družici tak pro sluneční astrofyziky jistě znamená doslova požehnání...

To určitě ano. Klasický koronograf lze běžně použít zejména ke studiu protuberancí, což jsme dělali i v Ondřejově. Na vysokohorských koronálních stanicích, například na Lomnickém štítu, je potom možné detekovat i vnitřní korónu – kdy

různých koronálních struktur a o fyzikálních procesech v nich.

? Mimočodem, jaké pocity člověk zažívá při sledování úplného zatmění? Je to opravdu tak neobvyklé až tajemné, jak se traduje?

Jde o úžasný zážitek. Osobně jsem zatmění Slunce pozoroval vždy jen sám pro sebe,

Družice místo Měsíce

? Pozorovat korónu Slunce v podmínkách blízkých úplnému zatmění bude i již zmíněná mise PROBA-3. Jakým způsobem má pracovat?

PROBA-3 neboli Project for On-Board Autonomy 3 představuje konfiguraci dvou satelitů pohybujících se v přesně stanovené formaci po protáhlé eliptické dráze kolem Země. Jde o první technologický test svého druhu v rámci ESA a v budoucnu poslouží pro koordinaci více satelitů rozmístěných daleko od sebe v kosmickém prostoru. Součástí mise tvoří vesmírný koronograf ASPIICS, který bude pozorovat vnitřní korónu Slunce v dlouhých periodách v podmínkách blízkých úplnému zatmění. Satelity jsou navrženy pro technologii letu ve formaci, kdy se jeden z nich – nesoucí dalekohled – bude pohybovat přesně sto



S Evropskou sondou Solar Orbiter v čisté místnosti testovacího komplexu v Německu, těsně před jejím přesunem na Floridu, odkud startovala do vesmíru

teoretiky, aby svými modely popsanou komplexnost jevů reálně vysvětlili. Na začátku mé vědecké kariéry se přenos záření ve hvězdných atmosférách modeloval na počítačích podobně velkých jako dnešní superpočítače, co se týká fyzických rozměrů, ale procesor tam byl jediný, s operační pamětí menší než jeden megabajt, a data se načítala z papírových děrných štítků. I tehdejší numerické metody byly mnohem méně efektivní než dnes: Stejný výpočet trvající tenkrát hodiny zvládne nyní notebook spolu s novými metodami za pár sekund. Mou vizí proto je, že by snad v blízké budoucnosti mohly pár sekund trvat i ty nejnáročnější simulace na superpočítačích nových generací. ✍

padesát metrů od druhého a bude se přes něj „dívat“ tak, jako by se člověk díval ze Země na zatmění Slunce. Měsíc v daném případě simuluje druhá družice, která v popsané formaci přesně zakryje sluneční disk, takže bude možné opět kontinuálně pozorovat děje probíhající v koróně.

? PROBA-3 by měla odstartovat koncem tohoto roku na indické raketě z tamní základny. Jaké objevy si od mise osobně slibujete?

Pokud se vše podaří podle plánu – i když start bude v roce 2024 – získáme skutečně úžasné snímky koróny až do blízkosti

ke slunečnímu povrchu, což umožní velká, sto padesát metrů dlouhá základna s externím zástínem. Vědecky je zajímavý i fakt, že při spojitěm několikahodinovém pozorování koróny můžeme dobře vidět, jaké struktury se v ní vyvíjejí. Jde o velký posun, protože dřív bylo možné vnitřní korónu sledovat jen při zatmění, a to pouhých několik minut. Kosmická pozorování jsou také mnohem kvalitnější než ta na vysokohorských observatořích.

? Jaké máte vize a plány do budoucna?
Dnešní observační sluneční fyzika velmi pokročila, a je tedy velkou výzvou pro

Mgr. Jana Žďárská pracuje ve Fyzikálním ústavu AV ČR, v rámci popularizace vědy publikuje v Československém časopise pro fyziku a dalších periodikách. Je držitelkou ceny Littera Astronomica a členkou České astronomické společnosti (ČAS), Kosmologické sekce ČAS (dříve místopředsedkyní), Astronautické sekce ČAS, porotkyní Československé astrofotografie měsíce (ČAM) a členkou Jednoty českých matematiků a fyziků



Solar Orbiter na cestě ke Slunci...