



Jiří Svoboda a kol.

Evropské kosmické mise s českou účastí



VÝZKUMNÝ PROGRAM

VESMÍR PRO LIDSTVO

Obsah

Seznam nejčastěji použitých zkratk ————— 2

Úvod ————— 3

1 Evropské mise ke Slunci ————— 5

**2 Meziplanetární sonda k ledovým měsícům planety
Jupiter ————— 18**

3 Exoplanety: klíč k největším záhadám lidstva ————— 27

**4 Mise Comet Interceptor - čekání na novou
kometu ————— 38**

5 Sonda k Venuši - EnVision ————— 45

6 Gravitační laboratoř LISA ————— 52

7 Horký a energetický vesmír ————— 58

Závěr ————— 66

Autoři ————— 68

Poděkování ————— 70

Seznam nejčastěji použitých zkratek

ATHENA	Advanced Telescope for High Energy Astronomy, vesmírná mise ESA
AV ČR	Akademie věd ČR
ASU	Astronomický ústav AV ČR
ESA	European Space Agency (Evropská kosmická agentura)
FZU	Fyzikální ústav AV ČR
JUICE	Jupiter Icy Moon Explorer, vesmírná mise ESA
LISA	Laser Interferometer Space Antenna, vesmírná mise ESA
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PLATO	Planetary Transits and Oscillations of Stars, vesmírná mise ESA
PRODEX	PRoGramme de Développement d'Expériences scientifiques
ÚFA	Ústav fyziky atmosféry AV ČR
ÚFCH JH	Ústav fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského AV ČR
ÚT	Ústav termomechaniky AV ČR

Úvod

Vesmír odpradávná přitahuje pozornost lidstva svou nespoutanou velikostí ukrývající mnohá ještě nepoznaná tajemství. Pozorování vesmíru vedlo k mnoha převratným objevům, které měnily chápání světa v lidské společnosti. Pečlivým pozorováním měnících se poloh planet na noční obloze dospěli astronomové ke zjištění, že Země není středem vesmíru, kolem něhož se vše točí. Naopak se ukázalo, že Země je jen nepatrným zrnkem v hlubokém vesmíru a dost možná není ani jedinou planetou, kde se mohl rozvinout život. Teorie relativity přinesla zcela nové chápání souvislostí mezi prostorem a časem i to, jakým způsobem funguje gravitace, základní hybná síla ve vesmíru. Otevřela i svět nejtajemnějších objektů ve vesmíru, černých děr, do kterých lze jen vstoupit, ale již není možné vystoupit zpět.

Poznávání vesmíru zažilo největší rozkvět poté, co se ukázalo, že vesmír nám o sobě dává cenné informace nejen ve viditelném světle, ale také v rádiových vlnách, infračerveném, ultrafialovém či rentgenovém záření, prostřednictvím kosmických částic nebo i formou gravitačních vln. Zdaleka ne vše prochází skrz zemskou atmosféru, a proto některé významné objevy byly možné jen s pomocí kosmických misí, které vynesly vědecké přístroje do vesmíru.

Zvláštní kapitolu pak tvoří průzkum těles Sluneční soustavy, které jsou i přes vesmírné vzdálenosti dosažitelné pro kosmické sondy. Ty tak na kamenitých tělesech mohou přímo přistát nebo je pozorovat z jejich oběžné dráhy. Přístroje na kosmických sondách také měří částice a elektromagnetické vlny spojené se slunečním větrem a jeho interakcí s magnetickými poli planet.

Výzkum vesmíru a kosmické mise mají v Česku bohatou tradici. Rozvoj těchto aktivit však není v dnešní době myslitelný bez široké mezinárodní spolupráce, která umožňuje řešit komplexní problémy, využívat špičkovou technologii a kombinovat lidské i finanční kapacity v jednotlivých zemích. Projekty vědeckých kosmických misí se staly inspirací pro rozvoj poznání vesmíru, ale i pro technologický pokrok inovativních odvětví průmyslu.

Pro Českou republiku se dveře k významné mezinárodní spolupráci otevřely 12. listopadu 2008, kdy se stala součástí Evropské kosmické agentury (European Space Agency, ESA)¹ v pořadí jako osmnáctá členská země. V současnosti ESA sdružuje 22 evropských zemí, má definovanou užší spolupráci s Kanadou a na významných mezinárodních projektech dále spolupracuje zejména s americkou kosmickou agenturou NASA. Poslání ESA lze stručně charakterizovat jako realizaci evropského vesmírného programu, který si klade za cíl zjistit více informací o Zemi, jejím bezprostředním

¹ <https://www.esa.int/>.

okolí, o naší Sluneční soustavě a vesmíru, jakož i rozvíjet družicové technologie a služby a v neposlední řadě také podporovat evropský průmysl.

První misí ESA, v níž má ČR významné zapojení, je sonda Solar Orbiter určená k výzkumu Slunce. O této misí a českém příspěvku k ní pojednává 1. kapitola. Další misí s českým příspěvkem je velká mise ESA k ledovým měsícům Jupitera, která se vydala na svou pouť v roce 2023. Nejen o jejím poslání, ale i o napětí při startu vypráví 2. kapitola. Další kapitoly se týkají budoucích příspěvků – o planetách mimo Sluneční soustavu a misích PLATO a Ariel je 3. kapitola. Kosmickou sondu, která bude číhat na nově vzplanutou kometu, představuje 4. kapitola. Mise plánovaná k Venuši je popsána v 5. kapitole. A poslední dvě kapitoly se týkají dvou velkých plánovaných misí ESA, které si mimo jiné kladou za cíl odhalit, jak vznikly superhmotné černé díry v centrech galaxií. Jedná se o misi LISA, která bude ve vesmíru detekovat gravitační vlny (6. kap.), a rentgenovou observatoř ATHENA (7. kap.).

Ve všech těchto projektech je Česká republika významně zastoupena při vědecké přípravě i v budování důležitých součástí vědeckých přístrojů. I díky společnému programu Strategie AV 21 Vesmír pro lidstvo² se nám podařilo zapojit do všech významných středně velkých a velkých plánovaných misí ESA. Hardwarové zapojení pak umožňuje zejména program ESA PRODEX,³ který v ČR spravuje Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy (MŠMT) s příspěvkem Ministerstva dopravy (MD), jež se stará o kosmické aktivity v ČR.

² <http://vesmirprolidstvo.cz>.

³ <https://sci.esa.int/web/prodex>.

1 Evropské mise ke Slunci

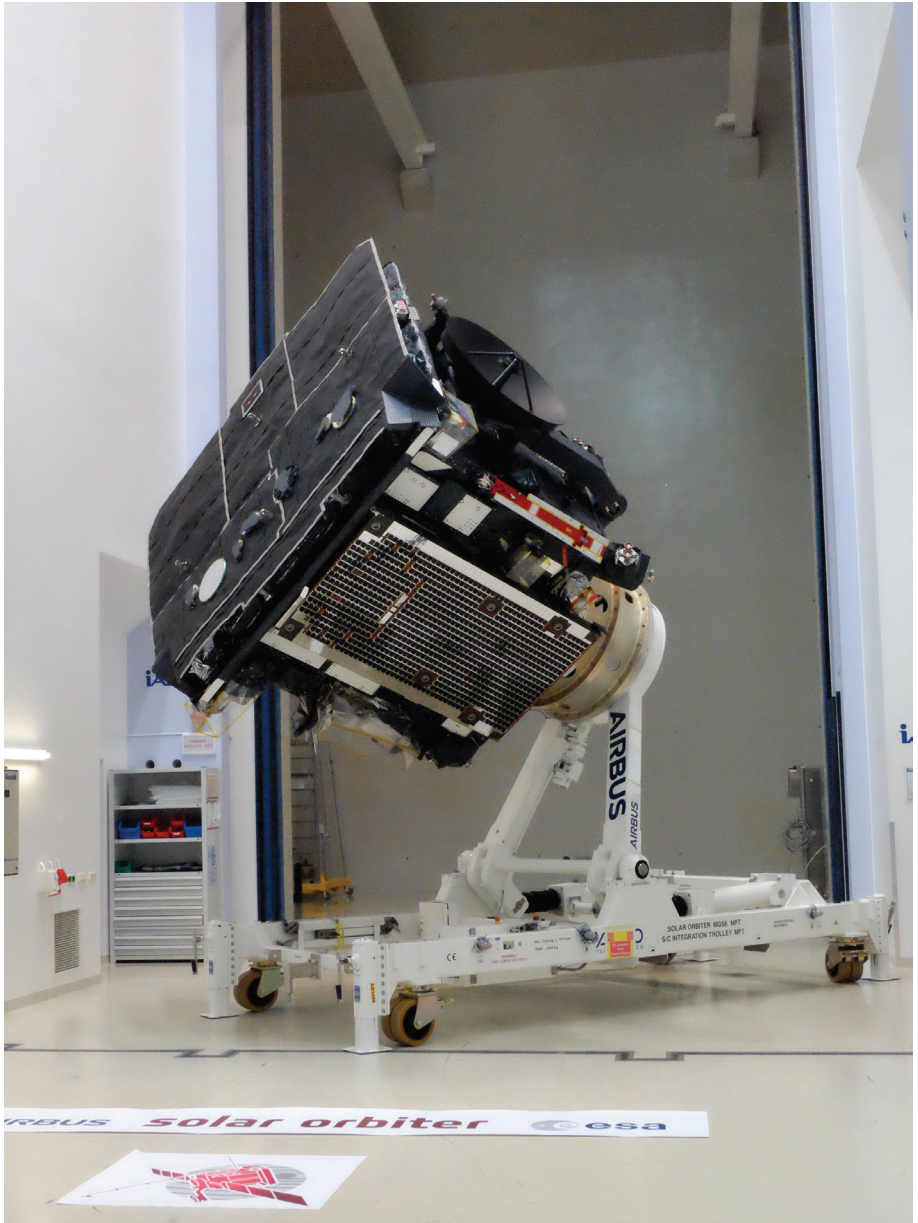
Petr Heinzl, František Fárnik, Stanislav Gunár, Jan Souček

V pondělí 10. února 2020 odstartovala z Kennedyho kosmického střediska na Floridě evropská sonda Solar Orbiter. Jedná se o ambiciózní misi ESA realizovanou ve spolupráci s americkou NASA, která sondu vypustila na raketě Atlas V 411 (**obr. 1.1**). Postupně díky gravitační asistenci planety Venuše dochází k přiblížení sondy ke Slunci až na 0,28 astronomické jednotky, což je vzdálenost Země–Slunce. Tam je až 13krát větší tok slunečního záření v porovnání se Zemí, a proto bylo třeba vyvinout speciální tepelný štít, kterým jsou přístroje na palubě sondy chráněny a ve kterém se nacházejí otvory pro teleskopy (**obr. 1.2**). Na palubě Solar Orbiter se nachází celkem 10 vědeckých přístrojů, z nichž šest tvoří teleskopy na pozorování sluneční atmosféry, a to především při největším přiblížení ke Slunci, kdy budou přístroje využívat velkého prostorového rozlišení. Zbylé čtyři jsou tzv. in situ přístroje, měřící v aktuální poloze sondy. Oběžná dráha sondy je velmi protáhlá a při největším vzdálení se od Slunce bude blízko k oběžné dráze Země. Postupně se bude rovina oběžné dráhy sklánět vůči ekliptice (tj. rovině, v níž kolem Slunce obíhá Země) až na více než 30 stupňů, což umožní vůbec prvá, zcela unikátní pozorování slunečních pólů. Předpokládaná nominální životnost sondy je asi šest let s pravděpodobným prodloužením o další roky. Hlavní vědecké cíle mise Solar Orbiter jsou velmi rozmanité, a to podle typu přístroje, ale jednotícím prvkem je komplexní výzkum sluneční atmosféry, kde vzniká sluneční vítr – proud nabitých částic, které letí do prostoru Sluneční soustavy – a kde také dochází k velmi energetickým procesům, jež významně ovlivňují heliosféru a často i naši planetu. Mezi tyto procesy řadíme především sluneční erupce a také mohutné výrony koronální hmoty při destabilizaci magnetických struktur v koróně. Jedním z klíčových cílů je tedy lépe pochopit působení aktivního Slunce na okolní Sluneční soustavu a především na Zem, čemuž se souhrnně říká kosmické počasí.

Pro vědce z České republiky je to mimořádně významný milník, neboť i přes jejich dřívější aktivity v kosmickém výzkumu je to poprvé, co se mohli aktivně zapojit do významné evropské mise nejen svou odbornou expertizou, ale i konkrétními příspěvky k vývoji a výrobě jednotlivých přístrojů. Každý přístroj byl navržen, vyroben a důkladně otestován příslušným mezinárodním konsorciem, jehož členy jsou v případě čtyř přístrojů také čeští odborníci. Do vývoje a výroby byly kromě akademických pracovišť zapojeny i české průmyslové subjekty. Astronomický ústav AV ČR (ASU) je ve vedení konsorcia koronografu Metis (hlavní vedoucí zemí je Itálie) a podílel se i na rentgenovém teleskopu STIX (PI Švýcarsko). Z in situ přístrojů se AV ČR podílela na přístroji RPW (hlavní vedoucí zemí je Francie) prostřednictvím ASU a Ústavu fyziky atmosféry (ÚFA). Účast AV ČR byla možná jedině díky přistoupení České republiky k ESA (v roce 2008) a díky podpoře MŠMT (program ESA-PRODEX),



Obr. 1.1 Start evropské sondy Solar Orbiter 10. února 2020 na Floridě
(zdroj: ESA, NASA)



Obr. 1.2 Tepelný štít sondy Solar Orbiter (zdroj: ESA)

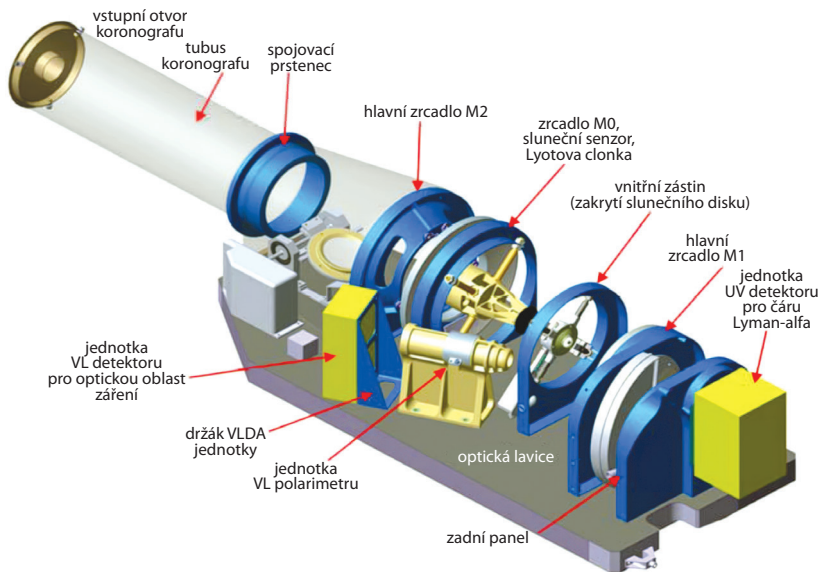
MD a AV ČR (Strategie AV21, program Vesmír pro lidstvo). Za úspěšnou účast na špičkové kosmické misi ESA Solar Orbiter byla týmům z AV ČR udělena v roce 2022 cena Akademie věd ČR. České zapojení do projektu Solar Orbiter zahrnuje také účast Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy na jednom z in situ přístrojů.

Kosmický koronograf Metis

Korónu jakožto vnější atmosféru Slunce lze relativně snadno pozorovat během úplných zatmění, kdy Měsíc zakryje celý sluneční disk a tím odstíní silné záření povrchu Slunce, které je o mnoho řádů intenzivnější než slabá koróna a její jemné struktury. V pozemních podmínkách lze korónu mimo zatmění sledovat jen stěží, částečně je to možné jen pomocí speciálního teleskopu, který teprve v roce 1932 zkonstruoval významný francouzský astronom Bernard Lyot. V podstatě napodobil úplné sluneční zatmění tím, že do optické dráhy mezi objektiv a okulár umístil clonku, která podobně jako Měsíc zastíní jasný disk Slunce. Dokonalé podmínky úplného zatmění lze do jisté míry napodobit jedině v kosmu. Tam odpadá negativní vliv zemské atmosféry, nicméně je stále nutné použít koronograf, protože silné záření slunečního disku by



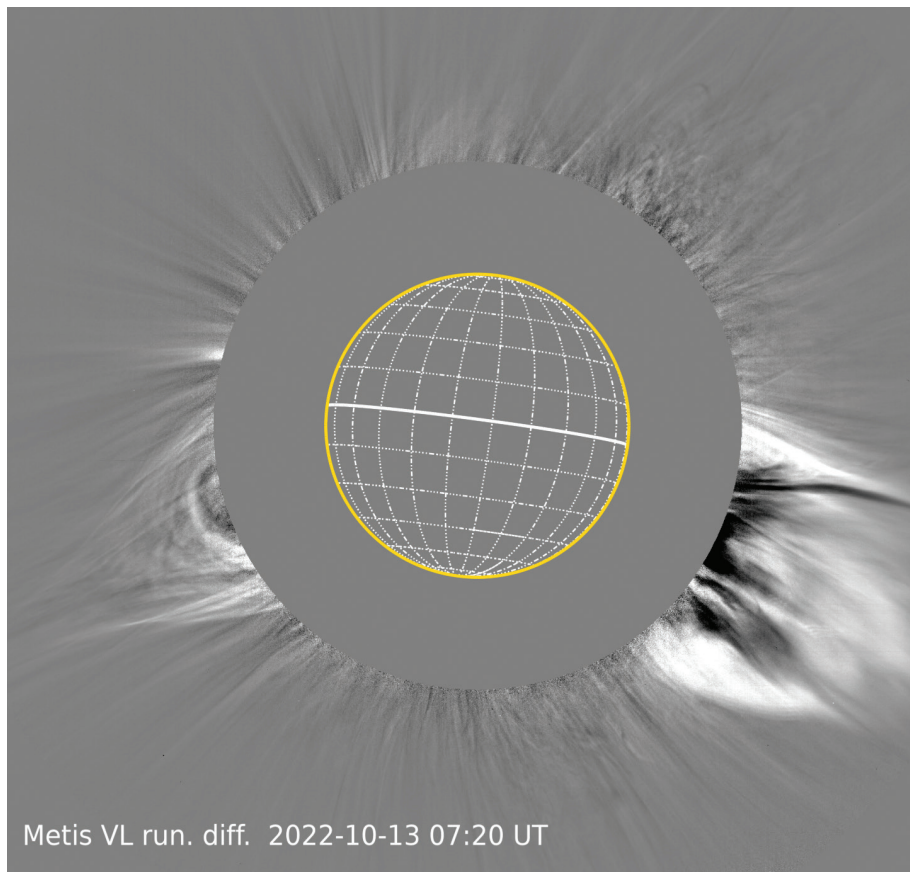
Obr. 1.3 Zrcadla M1 a M2 ve tvaru mezikruží (zdroj: TOPTEC)



Obr. 1.4 Optické schéma Metisu (zdroj: Konsorcium Metis)



Obr. 1.5 Celkový pohled na koronograf Metis během laboratorních testů (zdroj: Konsorcium Metis)

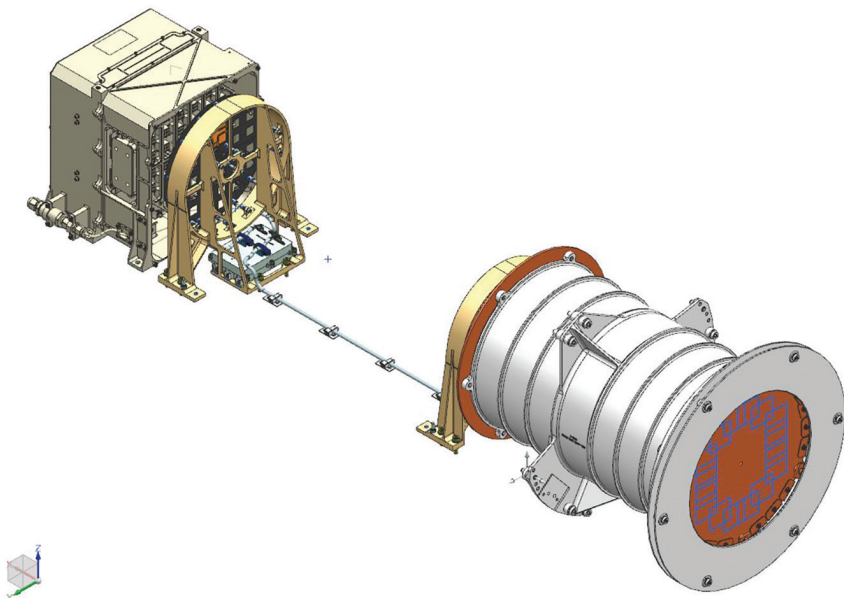


Obr. 1.6 Velký výron koronální hmoty detekovaný koronografem Metis. Sluneční disk ohraničuje žlutá kružnice, zatímco šedý kruh představuje zakrytou oblast stínítkem (jakoby vytvářejícím „umělý měsíc“ při zatmění). Jemná struktura výronu koronální hmoty je na obrázku patrná (zdroj: ESA, Konsorcium Metis)

i tak ovlivnilo sledování slabé koróny v důsledku rozptylu světla v samotném přístroji. Zkušenosti získané pomocí předchozích kosmických koronografů LASCO a UVCS na sondě ESA Solar and Heliospheric Observatory vedly k návrhu nového koronografu Metis pro palubu Solar Orbiter (*Métis* je podle řecké mytologie bohyně rozumu). Metis v sobě spojuje výhody předchozích přístrojů, konkrétně možnost simultánně pozorovat korónu jak v bílém světle, tak v silné spektrální čáře vodíku Lyman α . Při této misi se nově nabízí možnost pozorování z blízké vzdálenosti od Slunce a pro delší

sérii pozorování využít korotace sondy se Sluncem – při největším přiblížení sonda obíhá kolem Slunce se stejnou úhlovou rychlostí, která odpovídá sluneční rotaci. Jedná se tedy o teleskop pro pořizování snímků koróny v bílém světle a v čáře Lyman α 121,6 \pm 10 nm (nanometrů, tedy 10⁻⁹ m). To samozřejmě do jisté míry omezuje jeho diagnostické možnosti, které je třeba doplnit o určité teoretické předpoklady. Novou možností, kterou navrhli čeští odborníci ve spolupráci s kolegy z italského Turína, by bylo využití spektrální čáry D₃ neutrálního helia 587.3 nm, která je obsažena v pásmu propustnosti optického filtru 580–640 nm. Měření polarizace v této čáře by mohlo vést k unikátnímu mapování magnetických polí v koronálních výronech, což by byl zcela jedinečný výsledek. Tato myšlenka je nyní ve stadiu praktického ověřování s použitím prvních pozorování pomocí přístroje Metis. Co se týče vlastní optické soustavy Metisu, jedná se o zrcadlový dalekohled Gregoryho typu, jehož jádro tvoří dvě zrcadla M1 a M2. Jde o nový typ zobrazení, obě zrcadla mají tvar mezikružích a jsou vyrobená ze speciálního tepelně stabilního skla Zerodur od firmy Schott. Tato zrcadla byla navržena a vyrobená v laboratořích TOPTec Ústavu fyziky plazmatu AV ČR v Turnově a splňují normy vysoké optické přesnosti zejména pro oblast UV záření (**obr. 1.3**). Optické schéma Metisu je vidět na **obrázku 1.4**, kde zcela vpředu je tzv. inverzní externí zástin omezující silné záření slunečního disku. Po průchodu celou optickou soustavou se nakonec pomocí optického dělicího členu světelný svazek rozdělí tak, že čára Lyman- α projde dál směrem do UV detektoru a optické záření se odrazí do boku a je dále analyzováno polarimetrem z tekutých krystalů, což je v kosmu použito vůbec poprvé. Výsledné obrazy v čáře Lyman- α a v optickém oboru (včetně polarizace) jsou pak snímány speciálními detektory a ukládány v paměti. Jejich vyslání na Zemi je však opožděno v důsledku omezené telemetrie Solar Orbiter. Celkový pohled na koronograf Metis během jeho laboratorních testů je na **obrázku 1.5**.

Metis je schopen zobrazovat viditelné a zároveň ultrafialové záření sluneční koróny a zachytit s velkým časovým a prostorovým rozlišením strukturu a dynamiku koróny v rozsahu 1,7–3,1 slunečních poloměrů (měřeno od středu slunečního disku) v případě největšího přiblížení sondy ke Slunci. Studium dynamických jevů v rozsáhlé koróně je jedním z nejdůležitějších cílů mise Solar Orbiter. Mezi hlavní vědecké otázky patří původ a urychlení pomalých i rychlých proudů slunečního větru, původ, zrychlení a transport energetických částic ve sluneční atmosféře a výrony koronální hmoty. Kromě samotného slunečního výzkumu detekuje Metis také komety pohybující se v blízkosti Slunce. K dispozici jsou již také první společná měření s americkou sondou Parker Solar Probe. Za účelem maximalizace vědeckého přínosu v každé fázi mise se měření Metisu často koordinuje s ostatními přístroji na sondě. Více podrobností o tomto kosmickém koronografu lze získat na stránkách konsorcia Metis <http://metis.oato.inaf.it/>. Astronomický ústav AV ČR se zaměřuje především na studium eruptivních protuberancí, což jsou výtrysky chladného plazmatu do koróny, a výrony koronální hmoty. Čeští vědci vyvinuli numerické kódy pro diagnostiku plazmatu,

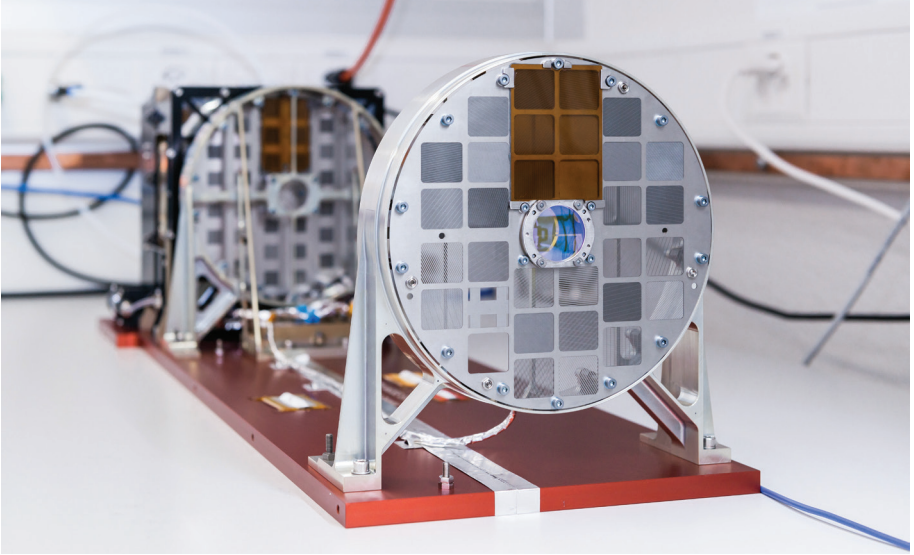


Obr. 1.7 Na pravé části obrázku je znázorněn průchod ochranným štítem, který chrání celou sondu před slunečním zářením (hlavně vysokou teplotou). Jeho rozměr není reálný vzhledem k bloku STIX, srov. **obr. 1.2** (zdroj: F. Fárník, ASU AV ČR)

kde vstupem jsou spektrální obrazy výronů koronální hmoty v časovém sledu vývoje v obou kanálech Metisu.

Rentgenový teleskop STIX

STIX (plným názvem Spectrometer-Telescope for Imaging X-rays) je spektrometr-teleskop pro zobrazení rentgenového záření. Přístroj pracuje v energetickém rozsahu od 4 do 150 keV (kde keV je kiloelektronvolt představující jednotku energie používanou při studiu vysokoenergetického záření). Tento rozsah umožňuje diagnostiku plazmatu ve slunečních erupcích o teplotě větší než 10 milionů Kelvina a diagnostiku netermálních elektronů urychlených během slunečních erupcí. Současně lze získat i obraz zdroje, odvodit rentgenové spektrum a kvantifikovat množství energie urychlovaných netermálních elektronů. Pro dosažení těchto cílů se využívá technika tzv. fourierovské transformace obrazu s využitím dvojité sestavy wolframových mřížek, umístěných před mozaikou pasivně chlazených 32 CdTe (kadmium-telluridových)



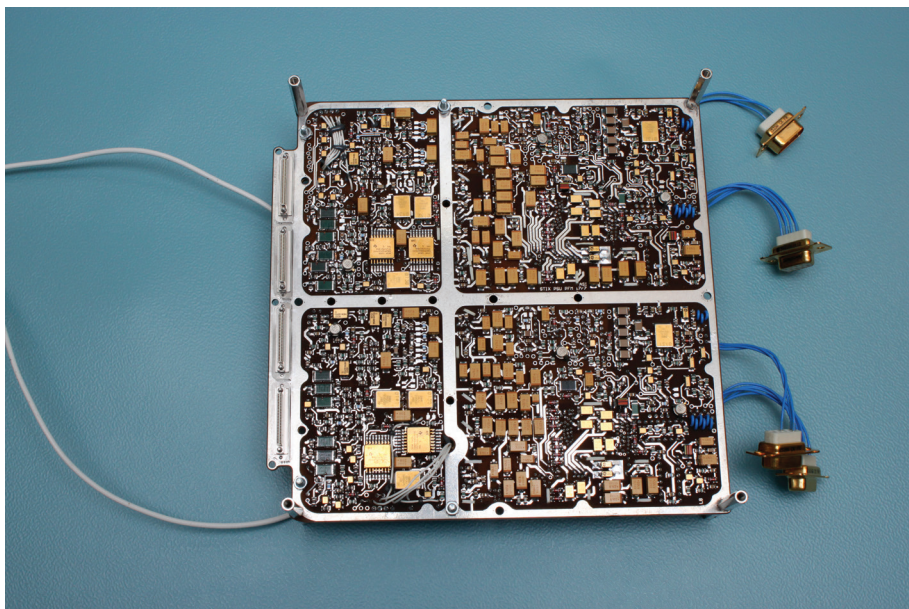
Obr. 1.8 Vstupní a výstupní sestava wolframových mřížek, v jejichž středu je otvor pro optické záření (zdroj: ASU AV ČR)

detektorů. Použitý způsob zobrazení umožňuje dosáhnout úhlového rozlišení obrazu v rozmezí 7–180 arcsec a energetického rozlišení 1 keV pro energii 6 keV. Předzpracování dat na palubě sondy znamená, že bez jakékoliv ztráty informace přístroj vyžaduje pouze minimální kapacitu telemetrického přenosu na Zemi.

Převažující mechanismus vzniku tzv. tvrdé rentgenové emise (tvrdé znamená s vysokou energií) v energetickém rozmezí měření STIX je tzv. brzdné záření (bremstrahlung) produkované urychlenými elektrony brzděnými okolní erupční atmosférou, především chromosférou, která je střední vrstvou sluneční atmosféry. Obecně mohou produkovat záření nad spodní hranicí rozsahu měření STIX jen nejenergetičtější elektrony ve sluneční koróně. Proto se pozorování tvrdé rentgenové emise zaměřuje především na studium energetických procesů ve slunečních erupcích. Data ze STIX nám umožňují určit intenzitu, spektrum, čas a pozici urychlování elektronů v oblasti erupce a současně poskytují informace o objemu, hustotě a teplotě termálního plazmatu v erupci. Tato měření pomáhají splnit dvě hlavní vědecká zadání projektu Solar Orbiter, tedy 1) porozumět procesům urychlování elektronů a jejich transportu do meziplanetárního prostoru a 2) určit magnetickou spojnici mezi sondou a zdrojem elektronů na Slunci. To umožňuje zajistit návaznost pozorování přístrojů in situ a teleskopů sondy. Studium rentgenové emise z erupcí se zabývá ASU již dlouhodobě, konkrétně od sedmdesátých let minulého století, a to přes analýzu

tvrdé rentgenové emise ze satelitu NASA-RHESSI až po numerické modelování procesů v erupčním plazmatu.

Přístroj STIX je znázorněn na **obrázku 1.7**. Sluneční záření vstupuje do přístroje vstupním oknem (vpravo), které má zároveň velmi důležitou roli: chrání detektory a elektroniku před velmi intenzivním zářením v blízkosti Slunce a umožňuje tak udržet vnitřní teplotu přístroje v potřebných mezích. Okno prochází ochranným štítem sondy. Vstupní i výstupní deska tohoto okna je z berylia (tloušťka 2 a 1 mm), které je zcela propustné pro tvrdou rentgenovou emisi a současně zeslabuje termální rentgenové záření, kde by v případě velkých erupcí hrozilo přehlcení detektorů. Uprostřed obou desek je otvor pro optické záření, potřebné pro navigační systém (**obr. 1.8**). Pro zobrazení v oblasti tvrdé rentgenové emise není možné použít přímo zobrazující techniku jako v běžných teleskopech. V případě STIX byla použita metoda fourierovské transformace využívající zobrazení pomocí dvou soustav speciálních mřížek a matice 32 detektorů. Vzdálenost mezi těmito soustavami mřížek je 55 cm. Mřížky jsou vyrobeny z wolframu, tj. z materiálu, který při zvolené tloušťce blokuje (nepropouští) rentgenové záření. V jednotlivých destičkách wolframu jsou vyfrézovány štěrbinny o různé šířce a v různých směrech (viz **obr. 1.8**). Po ozáření vstupní sestavy



Obr. 1.9 Napájecí zdroj přístroje STIX před integrací do bloku počítače vyrobený v ASU (zdroj: ASU AV ČR)

mřížek a po následném průchodu záření přes výstupní sestavu mřížek se na matici detektorů registruje signál, který v sobě obsahuje obrazovou informaci. Na výstupu detektorů následně dostáváme tzv. fourierovské komponenty, které se telemetrií přenášejí na Zemi a umožňují na počítači rekonstruovat obraz rentgenového zdroje.

Tok rentgenových kvant, vycházející z výstupní sady mřížek, dopadá na matici dvaatřiceti CdTe detektorů, vyvinutých a vyrobených ve Francii. Všechny detektory mají vlastní elektroniku, která zajišťuje zesílení každého jednotlivého pulzu, jeho tvarování a převod analogového zobrazení na digitální výstup před jeho odesláním do přístrojového počítače. Poslední část tohoto bloku obsahuje tzv. Instrument Digital Processing Unit (IDPU) neboli počítač, který jednak kontroluje a řídí celý přístroj a dále pak zpracovává registrovaná data a připravuje jejich předání do telemetrické soustavy sondy. Důležitá část, umístěná v bloku IDPU, je vysokonapěťový zdroj pro napájení detektorů a nízkonapěťový zdroj pro napájení celé elektroniky přístroje. Právě tato část byla vyvinuta, vyrobena a otestována v ASU. Finální osazení součástek zajistila firma CSRC v Kroměříži v tzv. čisté místnosti splňující přísné normy ESA kladené na prostředí, ve kterém se mohou vyrábět letové kusy pro kosmickou misi. **Obrázek 1.9** ukazuje napájecí zdroje před integrací do bloku počítače. Pro zvýšení spolehlivosti jsou jak napájecí zdroje, tak samotný počítač zdvojené. Kromě našeho podílu na vývoji a výrobě hardwaru se ČR zavázala dodat i letový software pro přístroj STIX, jehož značnou část realizovala pražská firma ESC Aerospace.

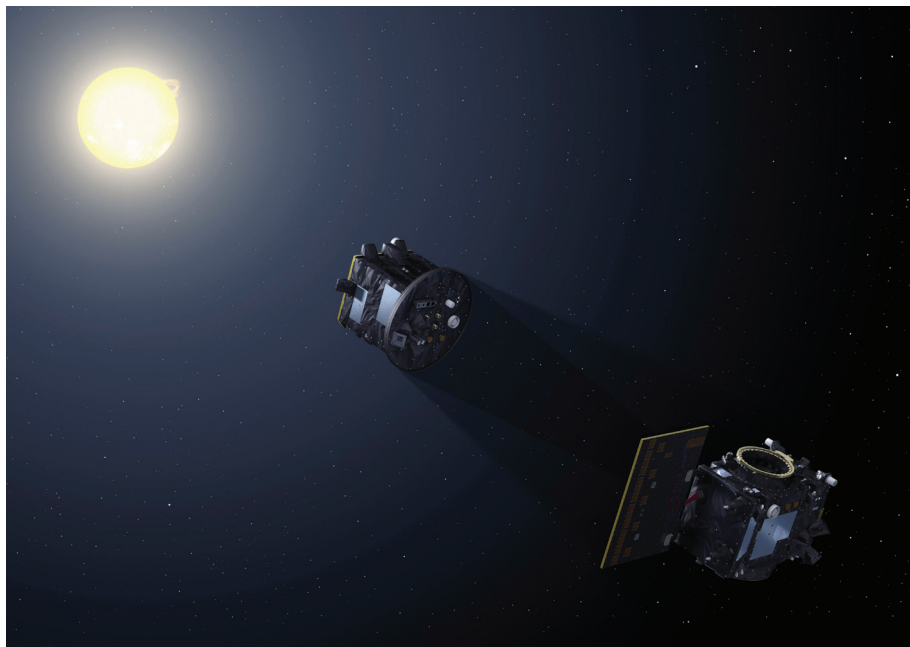
Přístroj STIX úspěšně prošel testovací fází sondy v červnu 2020 a získaná data byla použita v několika vědeckých studiích o tzv. mikroerupcích. Od ledna 2021 pracuje v nominálním režimu a jako jeden z mála přístrojů na Solar Orbiter pozoruje Slunce téměř nepřetržitě. Základní informace o přístroji STIX a získaná data lze nalézt na internetové stránce Solar Orbiter-STIX Data Center, <http://datacenter.stix.i4ds.net/>. Rentgenová pozorování získaná přístrojem STIX se využívají zejména ve spojitosti s dalšími přístroji, pozemními i družicovými, a to jak s těmi v okolí Země, tak na palubě Solar Orbiter. Tématem prvních vědeckých prací s využitím dat ze STIX jsou zejména energetické procesy ve slunečních erupcích, jejich spojitost s výrony koronální hmoty či eruptivními protuberancemi. Tým v ASU využívá data také ve spojitosti s místními rádiovými pozorováními ke studiu rekonexních procesů.

Přístroj RPW

Přístroj Radio and Plasma Waves (RPW), na jehož vývoji se čeští odborníci také významně podíleli, je určen k měření elektromagnetických vln, které mají původ ve sluneční koruně a ve slunečním větru, řídkém a horkém plazmatu, jež proudí celou Sluneční soustavou. Měření slabých fluktuací elektromagnetického pole se provádí pomocí tří prutových antén o délce 6,5 m a cívkového magnetometru instalovaných

vně sondy. Elektrické signály z těchto senzorů jsou následně digitalizovány a dále analyzovány v elektronické jednotce přístroje RPW. Ústav fyziky atmosféry a Astronomický ústav AV ČR vyvinuly dva subsystémy pro tuto elektronickou jednotku: zdroj regulovaného nízkého napětí, napájející celý přístroj RPW, a digitální analyzátor plazmových vln Time Domain Sampler (TDS). Tento modul umožňuje elektromagnetické signály nejenom zaznamenávat s vysokým časovým rozlišením, ale provádí také prvotní digitální zpracování naměřených dat s cílem vyhledat zajímavé jevy a vytvořit už na palubě družice jejich statistickou charakterizaci. Takto předvybraná data jsou poté odeslána na Zemi k dalšímu vědeckému zpracování.

Přístroj RPW je v provozu téměř nepřetržitě od startu sondy v roce 2020. Za dobu svého provozu odeslal zpět na Zemi mnoho cenných vědeckých dat, která se stala mimo jiné podkladem pro studie vzniku slunečních rádiových emisí a jejich šíření Sluneční soustavou. Solar Orbiter pravidelně prolétá oblastí slunečního větru, kde rádiové vlny vznikají působením svazků vysokoenergetických elektronů na okolní plazma. Zdrojem těchto svazků jsou sluneční erupce a přístroje na palubě Solar Orbiter včetně RPW nám nabízejí vhled do mikrofyziky tohoto složitého jevu.



Obr. 1.10 Vizualizace obou satelitů mise Proba-3 při letu v přesné formaci tvořící obří vesmírný koronograf ASPIICS (zdroj: ESA, P. Carril)

Zajímavým výsledkem jsou také analýzy pohybu prachových částic ve Sluneční soustavě. Modul TDS dokáže identifikovat dopady prachových částic na tělo sondy podle charakteristických napěťových pulzů vybuzených na elektrických anténách. Četnost těchto dopadů se významně mění se vzdáleností od Slunce a eliptická oběžná dráha sondy umožňuje tuto závislost charakterizovat a odvodit z toho například typickou rychlost nebo velikost těchto prachových částic.

Mise Proba-3 a gigantický vesmírný koronograf ASPIICS

Misí Solar Orbiter evropský kosmický výzkum Slunce nekončí. Další misí v pořadí je Proba-3. Tato unikátní mise ESA poprvé využije přelomovou technologii letu satelitů ve velmi přesné formaci. Díky ní vznikne obří vesmírný koronograf ASPIICS složený ze dvou satelitů vzdálených téměř 150 metrů. První ponese zástin (tzv. umělý měsíc) a druhý bude mít na palubě teleskop koronografu. Díky velké vzdálenosti a vzájemné poloze kontrolované s milimetrovou přesností dokáže ASPIICS pozorovat sluneční korónu v podmínkách blížících se úplnému zatmění Slunce. To umožní pravidelná pozorování nízké koróny nacházející se těsně nad okrajem slunečního disku. Tato oblast je dosud nejméně prozkoumanou částí sluneční atmosféry. Je ale zároveň místem, kde dochází k akceleraci výronů koronální hmoty, nebo také místem počátku slunečního větru. Lepší znalost vývoje obou těchto fenoménů už od jejich prvotních fází je velmi důležitá pro neustálé zlepšování předpovědí dopadů sluneční aktivity na Zemi, tedy kosmického počasí.

Mise Proba-3 byla indickou raketou PSLV-XL úspěšně vypuštěna 5. prosince 2024. Její vysoce eliptická oběžná dráha s oběžnou dobou téměř 20 hodin vynese oba satelity mise do dostatečné vzdálenosti od Země a jejího gravitačního působení, aby bylo možné sestavit přesnou formaci po dobu šesti hodin. Pro pozorování sluneční koróny nese ASPIIC sadu spektrálních a polarizačních filtrů. Jedním z nich je úzkopásmový filtr s centrální vlnovou délkou 530,4 nm. Ten je určen k pozorování jemných koronálních struktur a jejich dynamiky v tzv. zelené koronální čáře železa Fe XIV. Dalším z filtrů, které má koronograf ASPIICS k dispozici, je filtr na pozorování čáry D₃ neutrálního helia 587,3 nm. Tento filtr umožní detailní studium struktury a dynamiky plazmatu erupčních protuberancí a výronů koronální hmoty od jejich vzniku.

Vědecká data získaná misí Proba-3 jsou ve velké míře komplementární k pozorování koronografem Metis na palubě mise Solar Orbiter. Možnost získat špičková pozorování stejných koronálních struktur ze dvou úhlů pohledu tak v nejbližší době slibuje velký vědecký přínos i možnosti přelomových objevů. Astronomický ústav AV ČR je úzce zapojen do vedení konsorcia koronografu ASPIICS, do vývoje a výroby hardwarových komponent koronografu ASPIICS byla zapojena laboratoř TOPTEC Ústavu fyziky plazmatu AV ČR v Turnově i národní průmyslové subjekty.

2 Meziplanetární sonda k ledovým měsícům planety Jupiter

Ondřej Santolík

Ve čtvrtek 9. února 2023 krátce před polednem místního času dosedlo na letiště Cayenne ve Francouzské Guyaně obří nákladní letadlo AN-124 v ukrajinských barvách. Vezlo na kosmodrom Kourou cenný náklad: evropskou meziplanetární sondu JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer). Skončily tím mnohaleté přípravy prvního z velkých projektů programu ESA Cosmic Vision. Sonda se nyní bude chystat na cestu k planetě Jupiter.

O dva měsíce později již probíhají v Kourou poslední přípravy ke startu. Nádrže sondy JUICE jsou plné okysličovadla a raketového paliva methyldrazinu, sonda je namontována na špičku nosné rakety Ariane 5 a zakryta aerodynamickým štítem pro první fáze letu. Den před plánovaným startem technici raketu vysouvají z vysoké montážní budovy BAF (Bâtiment d'Assemblage Final) na startovací rampu.

Sama sonda váží 2,4 tuny a nese s sebou zásobu 3,6 tuny paliva, čeká ji totiž hned několik gravitačních manévrů: zpět u Země a Měsíce v srpnu 2024, u Venuše v srpnu 2025, opět u Země v září 2026 a poslední gravitační prak u Země v lednu 2029 už pošle sondu přímo k Jupiteru, kam dorazí v červenci 2031.

Hlavním úkolem sondy JUICE je výzkum Jupiteru a jeho ledových měsíců se zvláštním zaměřením na měsíc Ganymedes. Až do prosince 2034 bude sonda obíhat Jupiter a shromažďovat vědecká data. Jsou naplánovány průlety poblíž měsíců Europa, Ganymedes a Callisto. Po navedení na oběžnou dráhu Ganymeda jej sonda JUICE podrobně prozkoumá a svou misi uzavře konce roku 2035 dopadem na povrch tohoto největšího měsíce Sluneční soustavy. U něj tedy celá pouť po dalších čtyřech letech výzkumů skončí.

První pokus o start sondy JUICE je naplánován na čtvrtek 13. dubna 2023 ve 14.15 středoevropského letního času. Do poslední chvíle nic nenasvědčuje tomu, že by mohl být start odložen. V době plánovaného startu je zataženo a čeká se jen na zážeh hlavního motoru nosné rakety. Pak jsou však v blízkosti kosmodromu detekovány blesky, a odpočítávání je zastaveno. Atmosférický výboj by v první fázi letu mohl poškodit citlivou řídicí elektroniku nosné rakety. Startovní okno je velmi krátké, nejde proto pár desítek minut počkat, až se vyčáší. Možnost startu se ale opakuje každý den po dva následující týdny. Další pokus se tedy odkládá na následující den.

Tentokrát je jasno, vzletu rakety se vzácným nákladem nic nebrání. Dne 14. dubna 2023 ve 14.14 středoevropského letního času dochází k zážehu hlavního motoru rakety a jejích dvou pomocných motorů, ve 14.42 se sonda oddělí od posledního stupně rakety a její signál po dlouhých minutách napínavého čekání zachytí v 15.04 antény řídicího střediska ESA v Darmstadtu, které má od této chvíle komunikaci se sondou

na starosti. V 15.33 sonda JUICE úspěšně rozvine všech deset segmentů svých obřích slunečních panelů o celkové ploše 85 m² a délce 27 m. Jsou 25krát větší, než by bylo potřeba, kdyby JUICE byla pouhou družicí Země, a zajišťují tak napájení vědeckých přístrojů a služebních systémů i ve vzdálenosti od Slunce pětkrát větší, než obíhá Země. Sonda se tak může konečně vydat na svou dlouhou cestu k planetě Jupiter a jejím ledovým měsícům.

V tu dobu již začíná práce na postupném ožívování vědeckých přístrojů, které sonda nese. Je jich celkem jedenáct: optické kamery, spektrometry, altimeter, radar, částicové detektory, transpondéry rádiového signálu a čidla elektrického a magnetického pole. Všechny se zaměří na Jupiter a jeho měsíce Europa, Ganymedes a Callisto.

Tito obří Jupiterovi souputníci jsou svou velikostí srovnatelní s některými planetami Sluneční soustavy. Očekává se na nich existence oceánů kapalné vody, které se skrývají pod ledovou krustou. Proto by na nich mohly být dobré podmínky pro život. Z předchozích měření sondy Galileo také víme, že měsíc Ganymedes má magnetické pole stejně jako Země a některé ostatní planety. Je to jediný měsíc s vlastní magnetosférou v naší Sluneční soustavě. Sonda Galileo u něj odhalila obdobné



Obř. 2.1 Loučení s Evropou: nakládání kontejneru se sondou JUICE do ukrajinského letadla AN-124 na letišti ve francouzském Toulouse 9. února 2023 před rozedněním (zdroj: ESA)

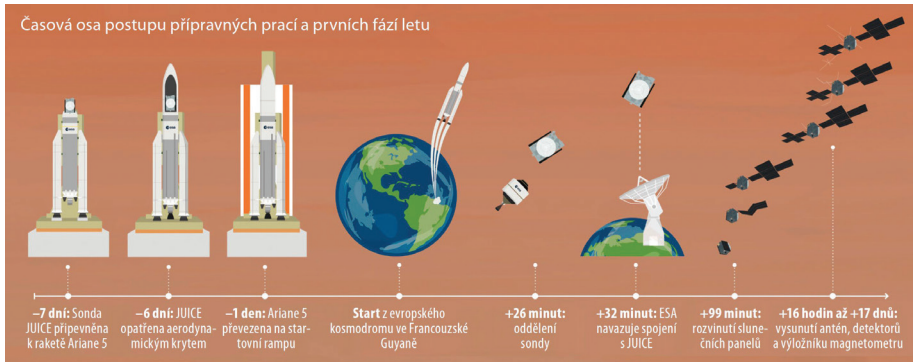


Obr. 2.2 Zakrývání sondy JUICE upevněné na špičce nosné rakety Ariane 5 aerodynamickým krytem se uskutečnilo 4. dubna v montážní budově BAF (Bâtiment d'Assemblage Final) na kosmodromu Kourou ve Francouzské Guyaně (zdroj: ESA)

elektromagnetické vlny na slyšitelných kmitočtech jako ty, které přispívají k urychlování elektronů v radičních páslech v okolí Země. Ovšem předchozí sondy mířící k Jupiteru měly poměrně nedokonalé vybavení. Žádná neměřila více složek elektromagnetického pole a nebyla schopna zjistit, odkud se vlny šíří.

O nich a o podobných jevech v magnetosféře Jupiteru zatím mnoho nevíme, ač by mohly být velmi důležité pro úroveň radiace v okolí planety. Právě na elektromagnetické vlny se zaměřil nový přístroj na palubě sondy JUICE, na jehož vývoji a stavbě spolupracovalo 25 institucí z 9 zemí, vedených Ústavem kosmické fyziky ve švédské Uppsale. Měření na slyšitelných kmitočtech připravili vědci a technici z oddělení kosmické fyziky ÚFA, kteří mají také zastoupení v úzkém vědeckém vedení celého přístroje pro výzkum rádiových a plazmových vln.

Během více než desetiletého vývoje přístroje tito vědci a technici postavili a postupně otestovali několik prototypů analyzátoru nízkofrekvenčních elektromagnetických vln, jeho elektroniky a palubních algoritmů pro zpracování dat,

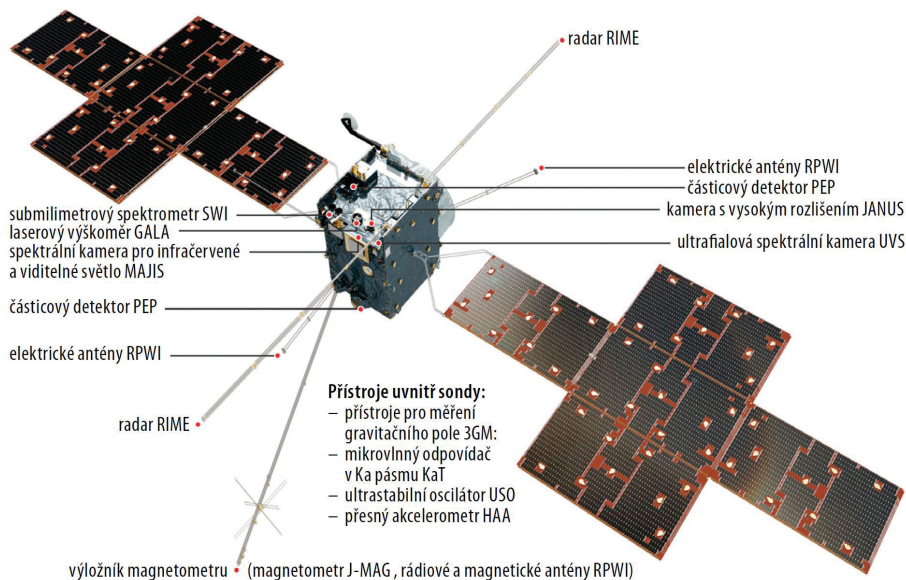


Obr. 2.3 Postup přípravných prací a prvních fází letu meziplanetární sondy JUICE (zdroj: ESA)



Obr. 2.4 Tým oddělení kosmické fyziky ÚFA AV ČR při společném sledování startu sondy JUICE s kolegy z ASU AV ČR 24. 4. ve 14.14 hod (foto O. Santolík, ÚFA AV ČR)

dohlíželi na sestavování a testy letového exempláře přístroje. Nadále jsou zodpovědní za jeho řízení a zpracování získaných dat. Nový přístroj na sondě JUICE nám dovolí zjistit, odkud se vlny šíří díky měření více složek elektrického a magnetického pole. Analyzátor bude zpracovávat signály z elektrických a magnetických antén a přímo na palubě sondy automaticky vyhodnocovat získaná data. Na Zemi lze totiž přenést

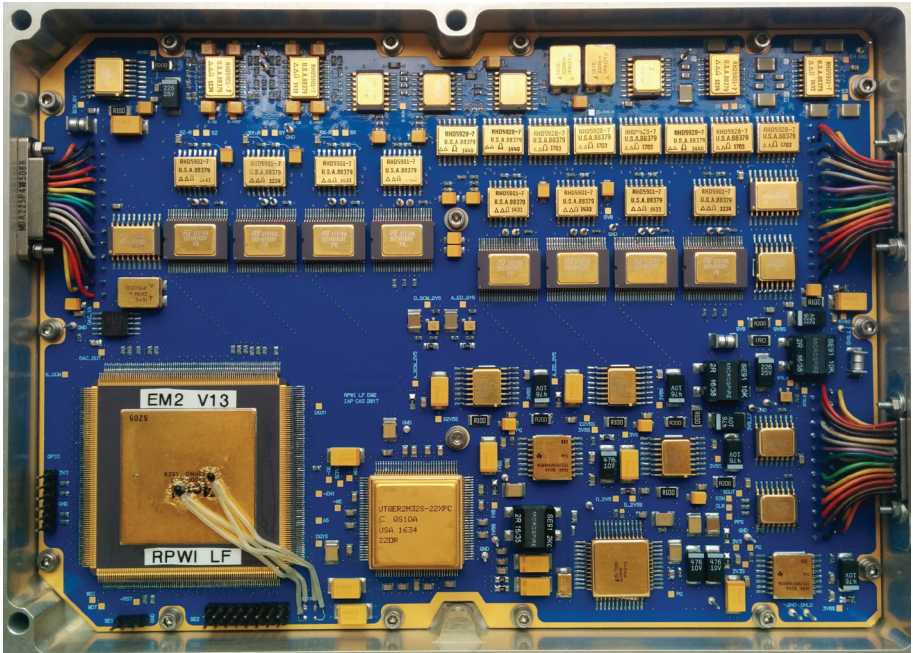


Obr. 2.5 Meziplanetární sonda JUICE je opatřena slunečními panely o celkové ploše 85 m² a nese 11 vědeckých přístrojů. Čidla a antény některých z nich jsou umístěna na výklopných ramenech (zdroj: ESA)

jen omezený objem informací, přístroj proto k odeslání automaticky vybere jen podstatná data. Vývoj probíhal ve spolupráci s techniky z ASU, kde navrhli napájecí zdroj celého přístroje. Obě české akademické instituce v rámci programu Vesmír pro lidstvo Strategie AV21 úzce spolupracují i s Ústavem přístrojové techniky AV ČR, který nezávisle získal technologickou zakázku během vývoje sondy stejně jako několik českých průmyslových podniků.

Vědci a technici z ÚFA a ASU jsou též součástí týmu, který řídí postupné zapínání a testy přístroje. Český analyzátor je poprvé po startu sondy spuštěn ve středu 19. dubna a všechny služební telemetrické údaje svědčí o jeho výborném technickém stavu. Následujícího dne jsou ze sondy vyslána první vědecká data našeho analyzátoru. V té chvíli byla ještě jeho čidla, magnetické antény postavené kolegy z Laboratoře plazmatické fyziky a École polytechnique v Paříži, složena blízko těla sondy. Projevuje se tak na nich rušení od systémů sondy. Tomu zabrání až umístění magnetických antén dostatečně daleko od těla sondy, na rozložitelném rameni o celkové délce přes 10 metrů.

K jeho rozložení je vše připraveno až v pátek 21. dubna v 16.30, poté co je náš analyzátor opět uveden do provozu, aby mohl společně s ostatními přístroji a systémy



Obr. 2.6 Jeden z prototypů analyzátoru nízkofrekvenčních elektromagnetických vln pro sondu JUICE, postavený v oddělení kosmické fyziky ÚFA (foto R. Lán, ÚFA AV ČR)

sondy monitorovat rozkládání ramene. Vše probíhá úspěšně a rozložení se daří hned na první pokus. Zaznamenáváme snížení rušení, když se čidla dostala do cílové polohy na rozloženém rameni. První data svědčí o výborné práci našich inženýrů a všech kolegů ze spolupracujících výzkumných institucí a průmyslových podniků. Měření tříslložkových magnetických antén jsou základem pro analýzu polarizace a šíření elektromagnetických vln, kterou náš přístroj poprvé umožní v okolí ledových měsíců Jupiteru.

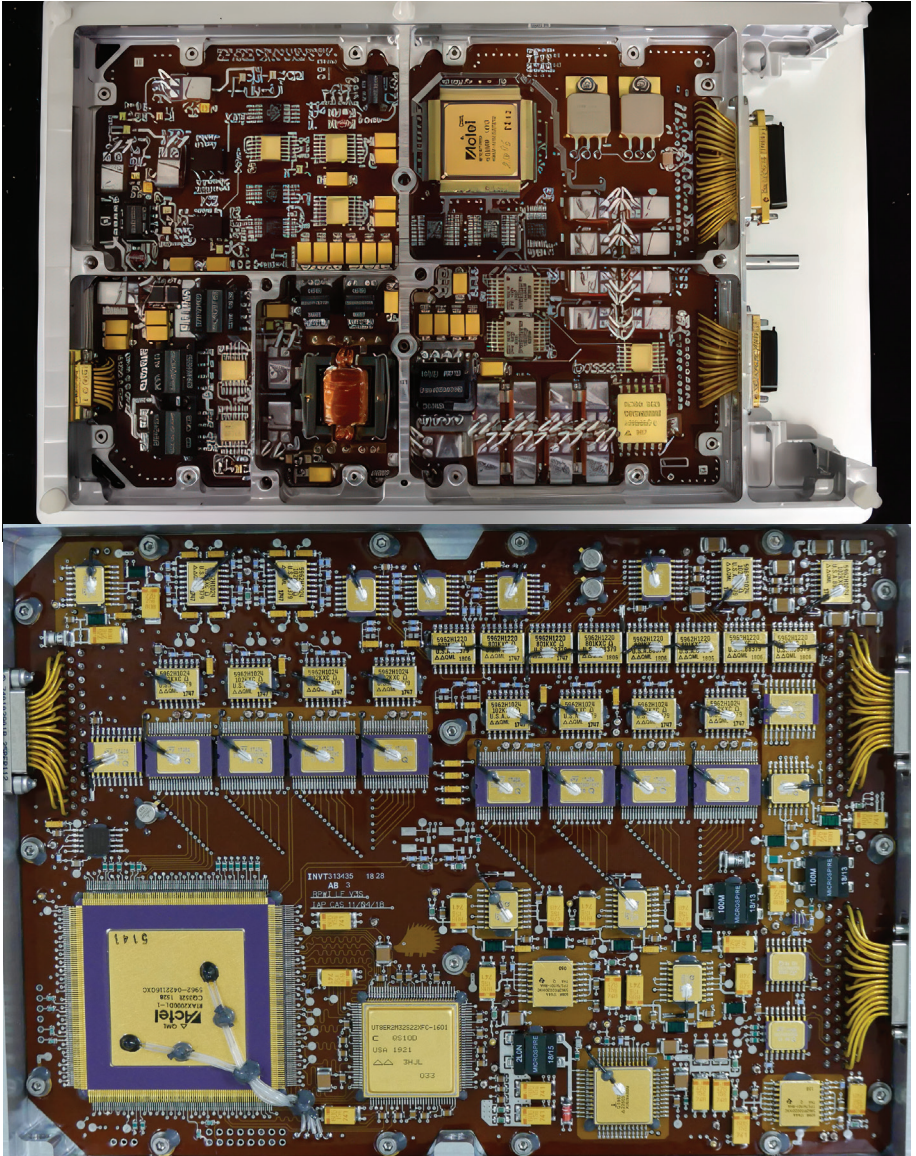
V následujících dnech dochází k řízenému rozkládání všech antén a ramen, kterými je sonda JUICE opatřena. Mezi nimi je i 16 metrů dlouhá anténa radaru pro průzkum ledové slupky měsíců Jupiteru, jež ovšem svému rozvinutí do pracovní polohy dlouho vzdoruje. Na vině je zaseklý kolíček, který ji tvrdošjně drží ve složeném stavu. Postup nápravy musí být pomalý, s důkladnými testy a ověřováním všech kroků. Jen tak se daří omezit pravděpodobnost lidské chyby při řízení těchto technicky náročných procedur. Po mnoha marných pokusech pomůže až otočení sondy anténou ke Slunci, které ji prohřeje a následné otřesy celé sondy anténu konečně uvolní.



Obr. 2.7 Tříosý cívkový magnetometr pro sondu JUICE postavený v Laboratoři plazmatické fyziky École polytechnique v Paříži poskytuje vstupní signál pro náš analyzátor (zdroj: LPP)



Obr. 2.8 Ramena s elektrickými čidly postavená polským podnikem Astronika jsou také připojena na vstup našeho analyzátoru (zdroj: ASU AV ČR, ÚFA AV ČR)



Obr. 2.9 Nahoře: Napájecí zdroj vyvinutý v ASU. Dole: výsledný model analyzátoru nízkofrekvenčních elektromagnetických vln vyvinutý na oddělení kosmické fyziky ÚFA (zdroj: ASU AV ČR, ÚFA AV ČR)

Bez problémů se naopak rozkládají tři 2,5 metru dlouhé antény pro měření vysokofrekvenčních rádiových vln. Čtyři 3metrová ramena nesou vodivá kulová čidla o průměru 10 cm, která poslouží jako vícesložkové elektrické antény pro náš analyzátor. Ve výsledné konfiguraci ze sondy tato čidla vyčnívají jako ježčí bodliny ve správném počtu nutném pro výzkum Jupiteru a jeho měsíců.

Během letu k Jupiteru jsou zatím na programu detekce dopadu kosmického prachu na sondu, což přispěje k výzkumu jeho výskytu, především v pásu asteroidů mezi Marsem a Jupiterem. Český tým bude též pracovat na dokončení vývoje nových verzí programů pro palubní zpracování dat, jejich testování a postupné odeslání do paměti přístroje tak, aby byl dobře připraven na překvapení, která jej u Jupiteru a jeho ledových měsíců za osm let čekají.

Literatura

- Grasset, O. et al., Jupiter ICy moons Explorer (JUICE): An ESA mission to orbit Ganymede and to characterise the Jupiter system. *Planet Space Sci* **78**, 1–21 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.12.002>.
- Boutonnet, A. et al. Designing the JUICE Trajectory. *Space Sci Rev* **220**, 67 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11214-024-01093-y>
- Santolík, O. Vesmírný poutník se přiblíží Zemi na své dlouhé cestě k Jupiteru a jeho ledovým měsícům. *Čs. čas. fyz.* **74**, 250–253 (2024).

3 Exoplanety: klíč k největším záhadám lidstva

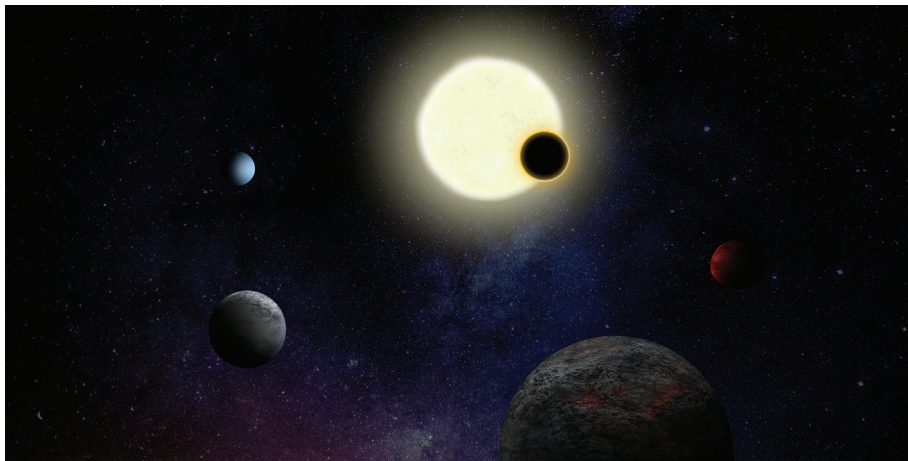
Martin Ferus, Petr Kabáth, Svatopluk Civiš

Existence světů a snad také života mimo Sluneční soustavu byly do nedávné doby výhradně tématem teoretických a filozofických úvah. Jsme první generací vědců, která disponuje nejen technologickými nástroji umožňujícími přinést jednoznačné důkazy o planetách obíhajících cizí hvězdy, ale v blízké budoucnosti budeme umět tato tělesa poměrně přesně popsat. Odhalíme jejich podobu, podmínky, které na nich panují včetně klimatu, charakteristiky povrchu, složení atmosféry a oblačnosti, možná zjistíme první indicie existence života a cizích civilizací. Exoplanety jsou hybným tématem moderní astrofyziky a dalších výzkumných disciplín. Do roku 1995 byla Sluneční soustava jedinou známou soustavou s planetami ve vesmíru. Objev 51 Peg b naprosto změnil naše chápání planetárních systémů: Jak může existovat obří plyná planeta obíhající v bezprostřední blízkosti svou mateřskou hvězdu jednou za pouhé čtyři dny? Dnes již známe téměř 6000 exoplanet a nebeský bestiář cizích světů rozšířil naše vize možného o nové typy světů – planety pokryté oceány, horké lávové trpaslíky i giganty, obrovské kamenné planety.

Čeští vědci jsou zapojení do dvou stěžejních projektů ESA: vesmírných dalekohledů PLATO a Ariel. Zatímco PLATO bude lovcem nových světů, Ariel dovolí jejich podrobný průzkum. Jedním z nosných témat, které snad nejvíce provokuje, ale zároveň je naprosto fascinující, je hledat „druhou Zemi“. Dosud nepoznané sestry našeho světa, označované jako Země 2.0, jsou pro astronomy důležité ze dvou zásadních důvodů. Ty stejně staré jako náš svět zodpoví otázku, zda jsme ve vesmíru skutečně sami. Pozorování velmi mladých planet a exoplanetárních soustav otevře okno do minulosti naší vlastní Sluneční soustavy a přinese zásadní fakta o vývoji planet pozemského typu, jejich raném prostředí, snad také o vzniku a výskytu života. Zodpovíme tak jednu ze základních otázek: Proč jsme?

PLATO aneb Jsme jedineční?

PLATO bude navazovat na úspěchy předešlých misí ESA CoRoT a NASA Kepler/K2 a TESS. CoRoT byl první exoplanetární a asteroseismologickou (zkoumající tzv. hvězdotřesení) misí, která objevovala i první malé kamenné světy. Mise Kepler/K2 dokázala, že malých exoplanet je ve vesmíru dokonce více než plyných obrů. Nyní mise TESS zkoumá a objevuje malé plyné světy podobné Neptunu. TESS je první misí, která pokryje velkou část oblohy, skoro 90 procent. Mise CHEOPS se nebojácně pouští ne do hledání, ale do charakterizace exoplanetárních prostředí. Celou tuto flotilu misí zkoumající exoplanety doplní na přelomu let 2026/2027 vesmírná mise PLATO



Obr. 3.1 Pokud planeta přechází z našeho pohledu přes disk hvězdy, dojde k poklesu jasnosti soustavy (zdroj: ESA)

(PLANetary Transits and Oscillation of Stars). PLATO je mise ESA a Česká republika je členem konsorcia zemí, které se podílejí na její přípravě.

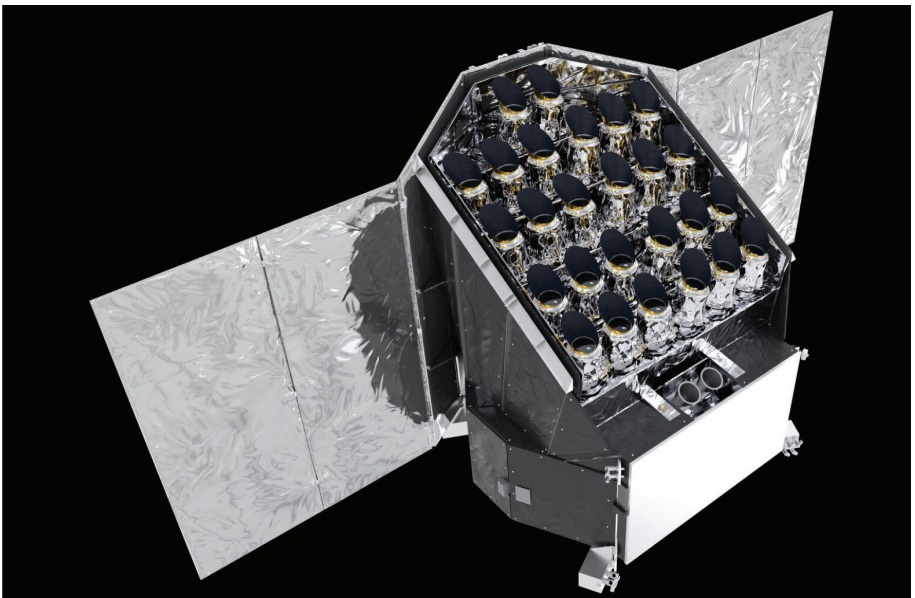
Vesmírná mise PLATO byla vybrána v roce 2014 po dlouhém úsilí jako mise M3 pro start v letech 2018–2025 (ESA Cosmic Vision 2015–2025). PLATO má odpovědět na spoustu otevřených otázek v oblasti výzkumu exoplanet, ale také ohledně jejich obyvatelnosti a chápání našeho místa ve vesmíru. Mise PLATO by měla objevit tisíce malých kamenných planet, z toho několik desítek planet podobných naší Zemi. Předpokládáme, že několik planet bude dokonce skoro stejných jako naše Země.

Do dneška se nám nepodařilo objevit planetu zcela podobnou naší Zemi, tedy takovou, jež obíhá hvězdu typu Slunce jednou za 365 dní. Jak je možné, že neznáme žádnou soustavu planet stejnou, jako je naše Sluneční soustava? Je naše Sluneční soustava jedinečná v celém vesmíru, nebo jsme jen podobné soustavy ještě nenašli, protože nemáme dostatečně citlivé přístroje? Jedná se tedy o nějaký výběrový jev? Zatím známe systémy s několika planetami, ale všechny obíhají svoje hvězdy za několik málo dní, a jsou tedy těmto hvězdám velice blízko, dokonce i velké plynné planety. A právě na tuto otázku bychom měli díky misi PLATO už brzy znát odpověď. Samozřejmě je možné, že druhou Zemi nenajdeme, ale vzhledem k parametrům mise PLATO to v tomto případě bude znamenat, že z nějakého důvodu jsme opravdu privilegovaní tím, že existujeme.

Objevem několika tisíců malých planet budeme také schopni odpovědět na otázku habitability, tedy obyvatelnosti planet, protože očekáváme, že spousta z těchto planet bude vhodná k charakterizaci exoplanetárních atmosfér. Objevit život přímo

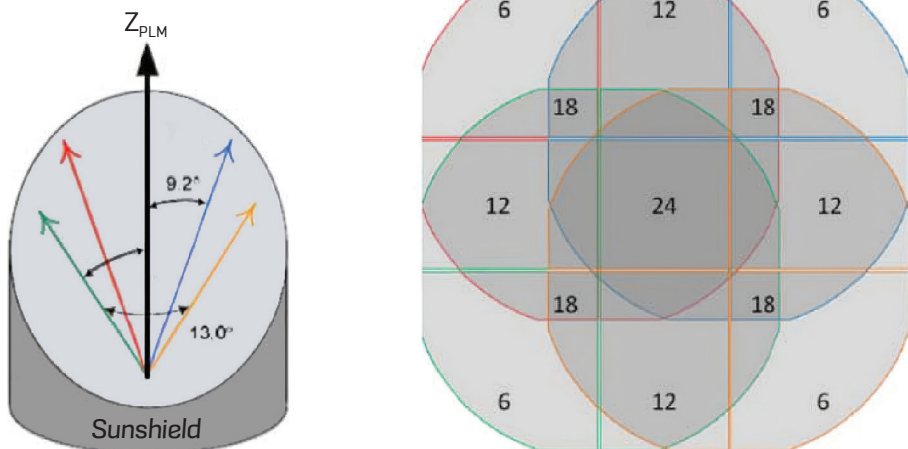
se nám zřejmě nepodaří, nicméně pokud budeme znát složení atmosfér nových planet, budeme moci popsat i prostředí na jejich povrchu, a budeme moci případně také posoudit i vhodnost k životu, jak ho známe ze Země, tedy k životu na bázi uhlíku, který potřebuje vodu a vzduch. Mise PLATO bude prvním krokem k charakterizaci exoplanet, jež proběhne v rámci jiné mise ESA pojmenované Ariel, ale také díky vesmírnému dalekohledu Jamese Webba (JWST) nebo evropskému dalekohledu ELT (Extremely Large Telescope) v Chile. Kromě exoplanetárního výzkumu bude PLATO přispívat rovněž k výzkumu hvězdné proměnnosti, k výzkumu hvězdných pulzací a k měření velikosti hvězd.

PLATO bude k objevování planet používat metodu detekce tranzitů (**obr. 3.1**). Pomocí měření jasnosti pozorovaných hvězd v zorném poli bude sledovat případný pokles jasnosti způsobený přechodem planety přes kotouč mateřské hvězdy. Podle míry zeslabení jejího záření (tzv. hloubky zákrytu) lze zjistit, o jak velkou planetu se jedná. Planety velikosti Jupiteru způsobí pokles jasnosti kolem 2 procent, avšak planeta o velikosti Země by způsobila zákryt o malinké hloubce zhruba 10 částí z milionu, tedy 0,000001, což odpovídá 0,0001 procenta. Mise PLATO bude dosahovat této bezprecedentní přesnosti a bude schopna objevit druhou Zemi, pokud existuje v našem relativně blízkém okolí. Další výhodou je, že PLATO bude pozorovat statisíce hvězd



Obr. 3.2 Vesmírná mise PLATO ve své finální podobě. Sestava 26 kamer připravených k instalaci na nosič PLATO (zdroj: PLATO Mission Consortium)

Sub-group lines-of-sight with respect to Z axis



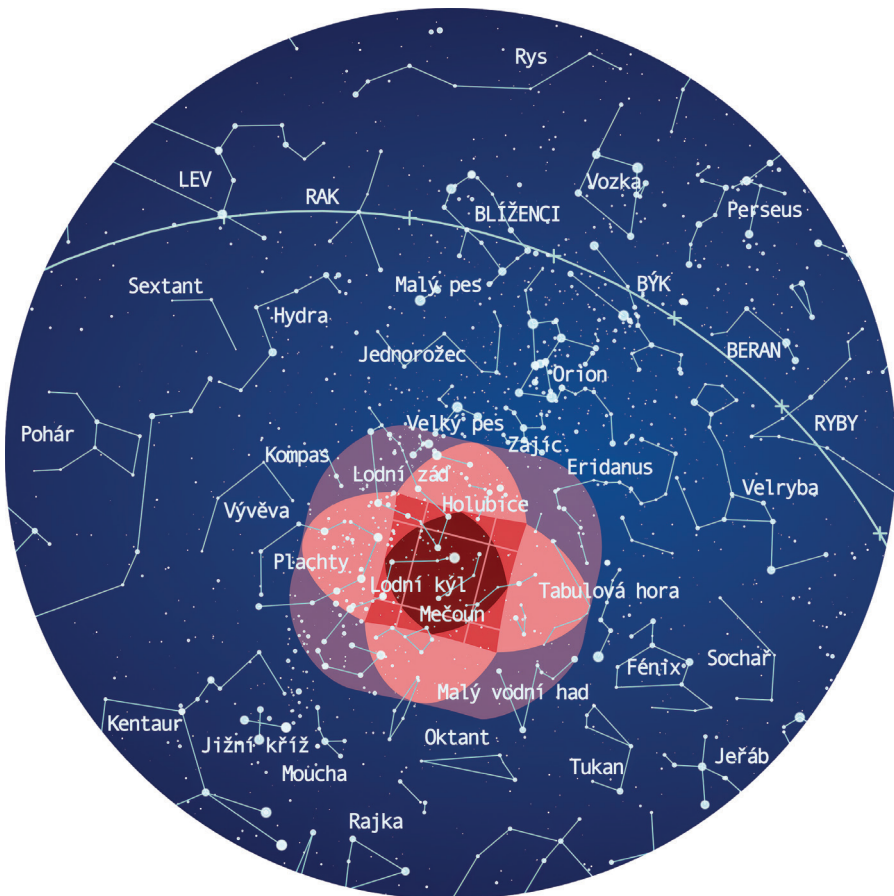
Obr. 3.3 Jednotlivé dalekohledy budou nesouosé, jejich zorná pole se tedy budou překrývat, což je na obrázku vyznačeno různými barvami (zdroj: Martin Ferus, ÚFCH JH, s využitím obrázků ESA, NASA)

naráz. Skoro všechny tyto jasné hvězdy budou pozorovatelné pozemními dalekohledy, a tím bude možné jejich případné planety dále charakterizovat.

PLATO bude sestávat z 26 teleskopů s průměrem čočky 12 centimetrů (**obr. 3.2**). Z celkového počtu budou dva teleskopy vybaveny rychlými kamerami, které budou snímat oblohu každých 25 sekund, a zbývajících 24 kamer bude pořizovat snímky jednou za 25 sekund. Každý z dalekohledů bude sestávat ze čtyř CCD segmentů, všechny o počtu 4510×4510 pixelů. Rychlé kamery budou určeny zejména ke snímání velice jasných hvězd. Celkem tak bude PLATO měřit hvězdy s jasnostmi 4 až 11 magnitud ve viditelném oboru spektra. Další výhodou bude také velké zorné pole pokrývající plochu až 1037 úhlových stupňů na obloze.

Zorná pole jednotlivých dalekohledů se budou překrývat, což zajistí velkou přesnost fotometrických měření, protože z překrývajících se oblastí bude možné nasbírat více fotonů a docílit lepší přesnosti. **Obrázek 3.3** znázorňuje, jak bude vypadat zorné pole poskládané ze zorných polí jednotlivých dalekohledů.

Pozorovací strategie mise PLATO je následující: Mise bude pozorovat jedno hvězdné pole po dobu minimálně 2,5 roku. Díky tak dlouhé době bude možné pozorovat minimálně dva zákryty planety podobné Zemi. Druhé hvězdné pole bude pravděpodobně pokrývat oblasti, které pozorovala v minulé dekádě mise Kepler. Nicméně tato strategie se ještě diskutuje. První zvolené pole je vyobrazeno na **obrázku 3.4**.



Obr. 3.4 První zvolené hvězdné pole, které bude pozorovat mise PLATO po svém startu po dobu minimálně 2,5 roku (zdroj: V. Nascimbeni)

Jak již bylo zmíněno, české výzkumné instituce se podílejí na přípravě mise PLATO. Hlavním koordinátorem za ČR je ASU, který se podílí na vývoji software pro misi PLATO a který bude po startu zpracovávat získaná vědecká data. ASU také pracuje na vývoji nového pozemního spektrografu PLATOSpec v Chile pro pozorování kandidátů mise PLATO. Kromě ASU se na přípravě mise podílí také česká firma S.A.B. Aerospace, s. r. o., která vyrábí části námořní lodě, jež přepraví dalekohledy na místo určení a také přepravní kontejnery pro 26 dalekohledů, které nyní pendlují mezi jednotlivými institucemi v rámci konsorcia. Například jednotlivé dalekohledy jsou

dodávány z Itálie a sestavovány v Nizozemsku z komponent z ostatních zemí konсорcia. Kontejnery jsou tedy stěžejním příspěvkem a vzhledem k tomu, že je třeba je udržovat naprosto čisté, jedná se opravdu o high-tech zařízení.

PLATO nám otevře dveře k pochopení vývoje naší Sluneční soustavy a také se dozvíme, zda je Země ve vesmíru jedinečná. PLATO připraví půdu pro misi Ariel a další projekty pro charakterizaci exoplanet. Čeká nás tedy zřejmě velice zajímavá dekáda a můžeme se těšit na zásadní objevy na poli výzkumu exoplanet.

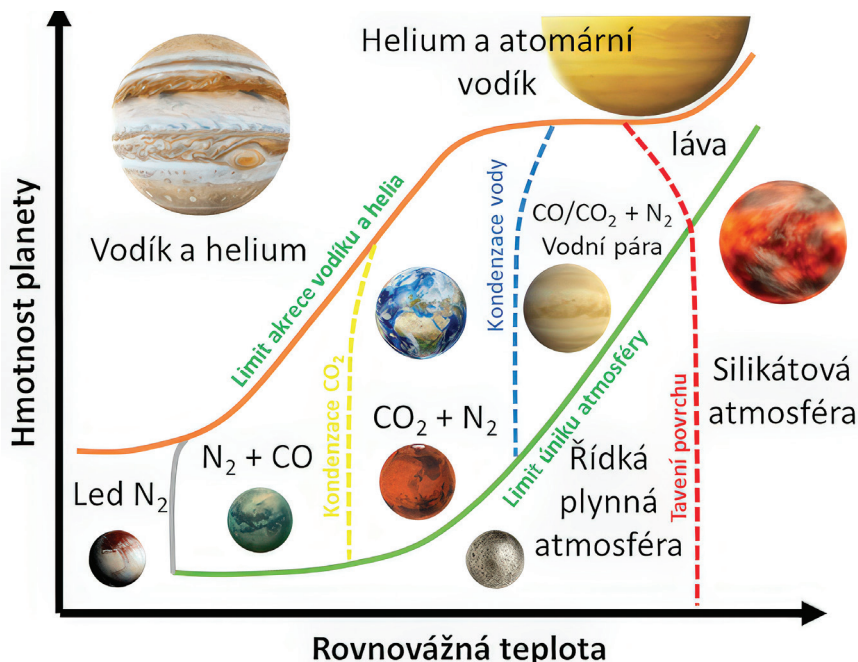
Ariel – statistika není nuda

Ariel bude první mise věnovaná systematickému měření chemického složení a tepelných vlastností atmosfér exoplanet, které při pohledu ze Země přecházejí přes kotouč mateřské hvězdy (tzv. tranzitují). Kosmický dalekohled vybavený metrovým zrcadlem bude schopen zachytit i velmi malé ztlumení jasnosti hvězdy během tranzitu exoplanety před jejím kotoučkem (cca 0,1 ‰). V tomto okamžiku spektrální analýza světla a zejména pak tepelného sálání provedená sofistikovanou sadou spektrometrů na palubě kosmického dalekohledu odhalí snížení intenzity v oblasti vlnových délek typických jako otisk prstu pro jednotlivé atmosférické molekuly (plynné chemické složky atmosféry a páry) i aerosoly (oblaka a prach).

Dalekohled bude pátrat po chemickém složení extrémně horkých planet, plyných obrů, ale také velkých superzemí. Slibně se jeví například detekce exotických molekul na planetách s teplotami nad 2000 °C. Tyto planety poskytnou vědcům jedinečný vhled do svých nití a tím také do historie vzniku planetárních systémů. Ariel bude schopen detekovat rovněž dobře známé, ale důležité složky atmosfér, jako jsou vodní pára, oxid uhličitý a metan. Při systematickém studiu odhalí kupříkladu sezónní změny v podmínkách či chemickém složení atmosfér, ať už se jedná o rozdíl mezi dnem a nocí, či střídání ročních období.

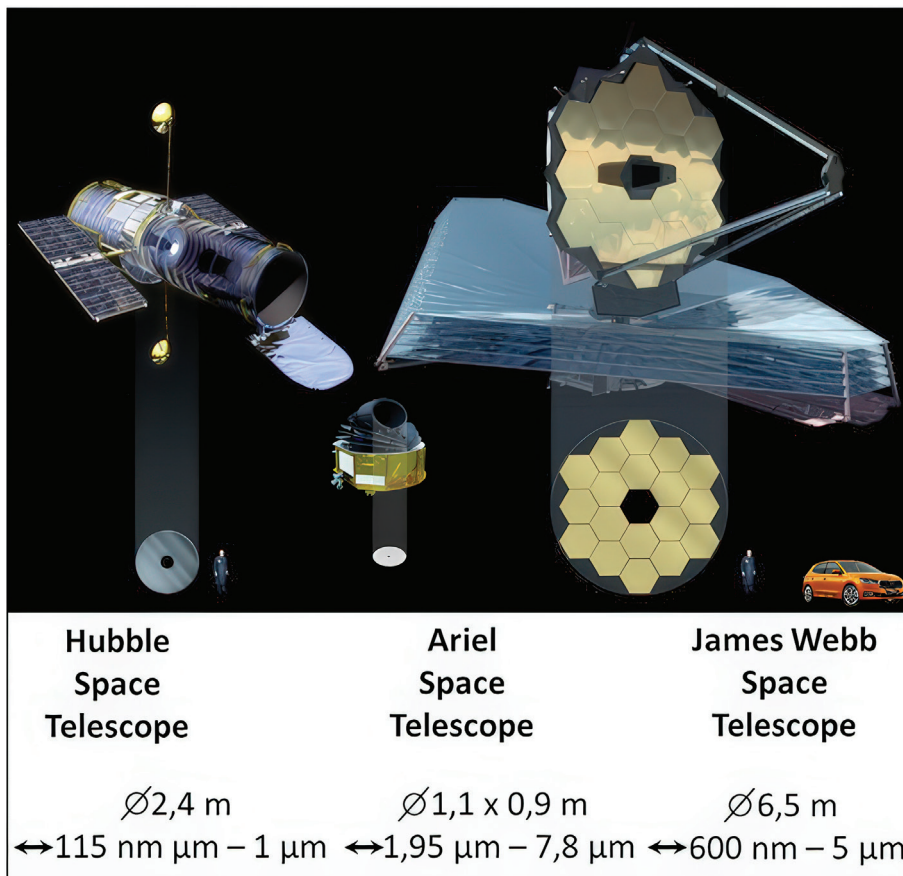
Cílem kosmického dalekohledu Ariel je prozkoumat statistický vzorek předem vybrané zhruba tisícovky exoplanet. Data dovolí odpovědět například na otázku, jestli naše současné představy o prostředí a podmínkách panujících na exoplanetách jsou správné, anebo nikoliv – odhad chemických a fyzikálních parametrů je totiž možný pouze na základě parametrického prostoru určeného hmotností planety a rovnovážnou teplotou danou typem mateřské hvězdy a vzdáleností planety (viz **obr. 3.5**).

Základem Arielu je mimoosý dalekohled Cassegrainova upořádání s primárním zrcadlem o velikosti 1,1 × 0,7 m. Za ním se nachází tři spektrální systémy charakterizující pozorované objekty metodou tranzitní spektroskopie: **NIR spec** pracující v rozsahu od 9090 cm⁻¹ do 5128 cm⁻¹ (1,95–1,1 μm), **AIRSO** s rozsahem měření od 5128 cm⁻¹ do 2564 cm⁻¹ (1,95–3,9 μm) s rozlišením R=100) a **AIRS1** s funkčním rozsahem od



Obr. 3.5 V současné době je těžištěm našeho poznání fyzikálních a chemických podmínek na vzdálených světech prostor parametrů určených relacemi mezi hmotností planety a rovnovážnou teplotou. Na rozdíl od mnohem většího a výkonnějšího teleskopu Jamese Webba, který prostuduje pečlivě vybrané asi dvě desítky exoplanet, Ariel poskytne statistická data o prostředí na stovkách cizích světů. Je pravděpodobné, že graf uvedený výše bude revidován či bude přidána celá řada výjimek pramenících z mnoha cest, kterými se může vydat evoluční vývoj planet. Krásným případem je Země uprostřed: Její atmosféra není tvořena z dusíku a oxidu uhličitého, protože na ní existuje rozvinutá biosféra, která planetu kompletně změnila. Jaké další vlivy mohou být příčinou odchylek od našich představ o evoluci planet? (zdroj: Martin Ferus, ÚFCH JH, s využitím obrázků ESA, NASA)

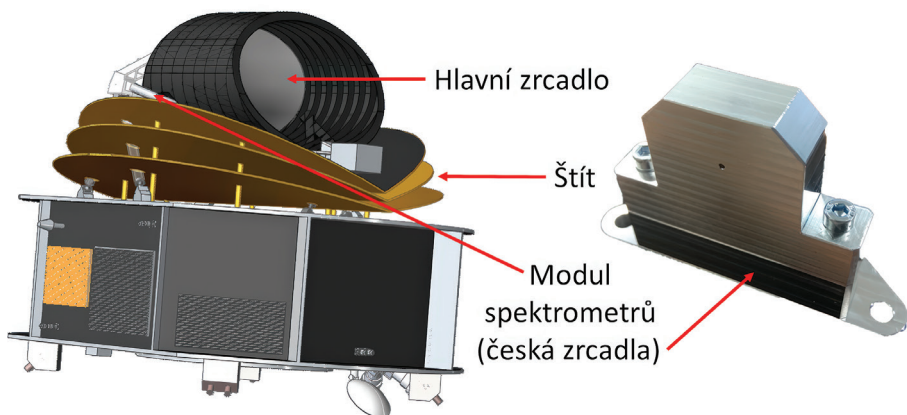
2564 cm^{-1} do 1282 cm^{-1} (3,9–7,8 μm) s rozlišením $R=30$. V současné době se uvažuje o detekci litogenních a refraktorních chemických látek, jako jsou SiO , CaO , AlO , TiO , VO , Fe , Mg , MgH , TiH , Na , K , FeO , FeH , dále středně těkavých atmosférických komponent jako HF , H_2S , SO , SO_2 , NO , NaH , HCl , HBr , KCl , PH_3 a v neposlední řadě typických atmosférických plynů (tzv. atmoofilních molekul), jako jsou H_2O , CO , O_2 , CO_2 , CH_4 , NH_3 , HCN , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 . Tyto chemické látky by měl teleskop rozpoznat také v oblačnosti planet. Proti v současné době fungujícímu dalekohledu Jamese Webba a Hubbleovu



Obr. 3.6 Srovnání velikostí kosmických dalekohledů. Dalekohled Ariel je o něco větší než osobní automobil. Uvedeny jsou rozměry primárního zrcadla a spektrální rozsah pozorování (zdroj: Martin Ferus, ÚFCH JH, s využitím obrázků ESA, NASA)

kosmickému dalekohledu je Ariel trpaslíkem. Ariel však „dohlédne“ dále do infračervené části spektra a cílem je prozkoumat stovky světů čili poskytnout velmi přesná statistická data. Nicméně, nejedná se o trpasličí zařízení, jak prozrazuje srovnání velikostí teleskopů s osobním automobilem na **obrázku 3.6**.

V současné době kosmický dalekohled Ariel překonal další milník, tzv. předběžné hodnocení designu užitečného nákladu (Payload Preliminary Design Review, PDR), což znamená, že všechny technické a vědecké specifikace jsou splněny a nic nebrání



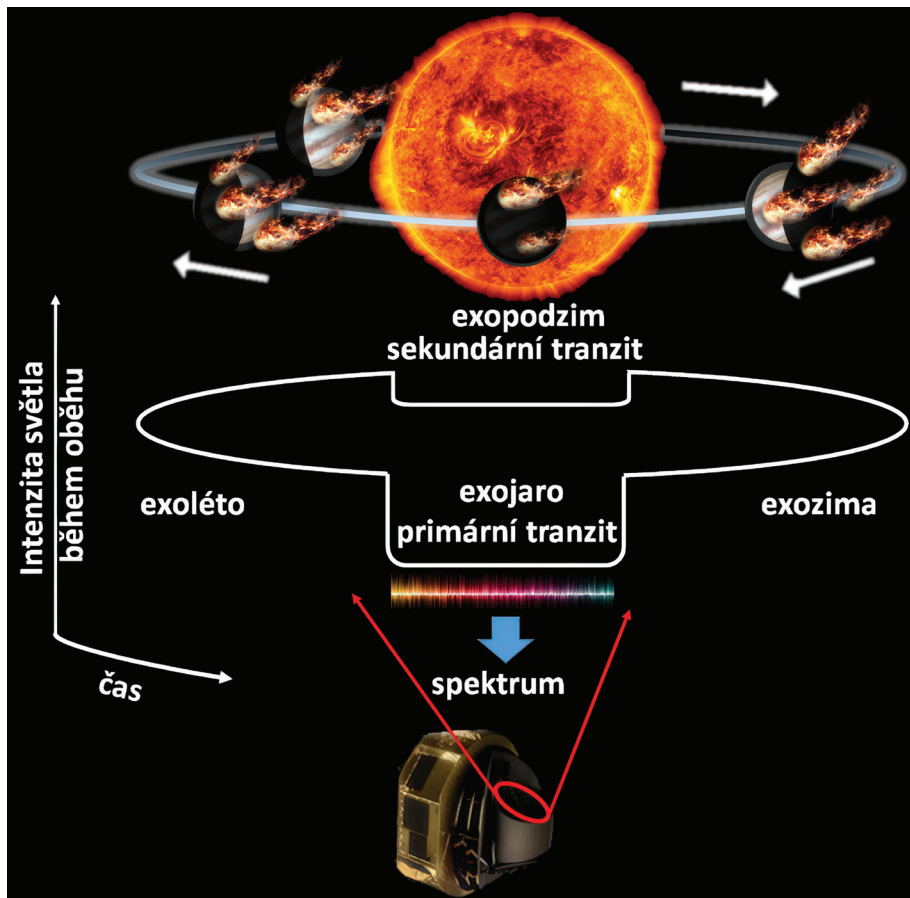
Obr. 3.7 Schematické znázornění kosmického dalekohledu Ariel a prototyp sekundárního zrcátka, za jehož výrobu zodpovídá centrum TOPTEC (zdroj: Martin Ferus, ÚFCH JH, s využitím obrázků ESA, NASA)

předpokládanému startu v roce 2029. V současnosti jsou všechny technologie mise připraveny ke konstrukci příslušných prototypů. Sekundární zrcadla umístěná v servisním modulu satelitu se vyrábějí v českém Výzkumném centru speciální optiky a optoelektronických systémů (TOPTEC), které je sekci Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., a patří mezi tzv. aplikační centra AV ČR (viz **obr. 3.7**). Ariel odstartuje z evropského kosmodromu Kourou ve Francouzské Guyaně na palubě nosiče Ariane 6 a vydá se na 1,5 milionu kilometrů dlouhou pouť do věčné temnoty panující ve stínu Země v druhém Lagrangeově bodu směrem od Slunce. Zde setrvá po dobu čtyř let. Na cestě jej bude provázet mise ESA Comet Interceptor (viz 4. kapitola).

Česká věda – spektrální data a drtivé dopady

Čeští vědci plní v rámci mise celou řadu úloh. Z hlediska technického zajištění mise se soustřeďují na tvorbu spektrální databáze jednak přímo využitelné konsorciem mise, ale také určené pro ověření funkčnosti optických komponent. Další úlohou českých vědců je výzkum související přímo s vědeckými cíli kosmického dalekohledu: odhalení evoluce vzdálených světů a možná také procesů, které hrály roli při vzniku života na Zemi. Jak mohou příběh zrodu života na naší planetě odhalit kosmické teleskopy?

Dokázali by si astronomové představit, jak vznikají hvězdy, kdyby nebyli schopni ve vesmíru pozorovat různá stadia jejich vývoje? Budou moci chemici a biologové



Obr. 3.8 Při spektrálním pozorování tranzitující exoplanety je atmosféra vzdáleného světa prosvěcována mateřskou hvězdou. Ve spektrálním záznamu v oblasti infračerveného záření jsou patrné absorpční pásy atmosférických plynů. Mezi ně patří i chemické látky, které vznikají či zanikají působením plazmatu vzniklého v atmosféře účinky impaktů. Právě tyto složky a jejich nerovnováha o impaktech nepřímo vypovídají. Dopady asteroidů tak lze detekovat pomocí teleskopu Ariel, tzn. mapovat jejich četnost, účinky a dovést podobu prostředí na raných planetách procházejících érou velkého bombardování. Právě to stálo podle představ českých vědců za vznikem života na Zemi. Bude odpovědí na otázku „Proč jsme?“ třeba: „Protože asteroidy?“ (zdroj: Martin Ferus, ÚFCH JH, s využitím obrázků ESA, NASA)

stejným způsobem pozorovat vznik života ve vesmíru? Zřejmě nikoliv, ale průzkum tisíců světů včetně planet zemského typu v raných stádiích jejich vývoje snad v blízké budoucnosti odhalí detaily o chemických a fyzikálních podmínkách, za kterých mohl život na Zemi vzniknout. Tyto výsledky nastaví parametry laboratorních experimentů.

Čeští vědci se zajímají obzvláště o jeden z výrazných evolučních procesů vývoje raných planet, éru tzv. velkého bombardování bludnými tělesy pohybujícími se po nestabilních drahách v mladých planetárních soustavách po dobu stovek milionů let po jejich vzniku. Možná se ukáže, že základní stavební kameny života vznikly právě následkem četných dopadů asteroidů. O tom, že základní stavební kameny života vznikají účinkem plazmatu vzniklého při impaktu, přinesli čeští vědci četné důkazy díky pokusům provedeným pomocí obrovských výkonových laserů v laboratořích. Celý proces zřejmě pokračoval v horkých lagunách na dně kráterů, snad kdesi na úpatí sopky v dusivé atmosféře přesycené kyanovodíkem, metanem a čpavkem.

Aby kosmické dalekohledy Ariel a James Webb mohly přinést důkazy o podobě planetárního prostředí ovlivněného impakty asteroidů, zaměřují se čeští vědci na samotnou jejich detekci pomocí sofistikovaných atmosférických a spektrálních modelů podpořených právě simulacemi impaktů pomocí výkonových laserů, kterými jsou ozařovány různé směsi plynů reprezentujících rané atmosféry planet. Tranzitní spektra v sobě ukrývají informaci o složení atmosfér, a pokud se najde shoda mezi chemikáliemi detekovanými ve směsích podrobených účinkům laserových jisker a složení či chemickou nerovnováhou v atmosférách cizích světů, přinese takové pozorování nepřímý důkaz o impaktech asteroidů (viz **obr. 3.8**). Přímé pozorování impaktů například ve formě záblesku, či dokonce kráterů na povrchu planet totiž není možné ani s pomocí nejmodernějších prostředků.

Závěrem...

V příštím desetiletí budou na oběžné dráze tři špičkové teleskopy sloužící ke studiu vzdálených světů. Lidé budou mít poprvé ve své historii příležitost zjistit pomocí vědeckých metod, zda jsme ve vesmíru skutečně sami. Možná, že se konečně dozvíme „kde tedy všichni jsou“. Naprosto zásadní pro zodpovězení této otázky není existence jednoho přístroje, ale hned tří unikátních zařízení: obrovského dalekohledu JWST schopného poskytnout nebývalé detaily i o malých planetách typu Země, Ariel poskytujícího přesná statistická data o stovkách světů a PLATO, který přinese důležité údaje pro obě mise. PLATO totiž identifikuje a charakterizuje exoplanety, jež Ariel a JWST prozkoumají pomocí tranzitní spektrometrie. Již v tuto chvíli je v primárním zorném poli PLATO dvacet cílových objektů teleskopu Ariel. Pro tranzitní spektrometrii PLATO poskytne důležitá fyzikální data, jako jsou přesné fotometrické křivky, údaje o rotaci, aktivitě mateřské hvězdy či přesné hmotnosti a velikosti exoplanet.

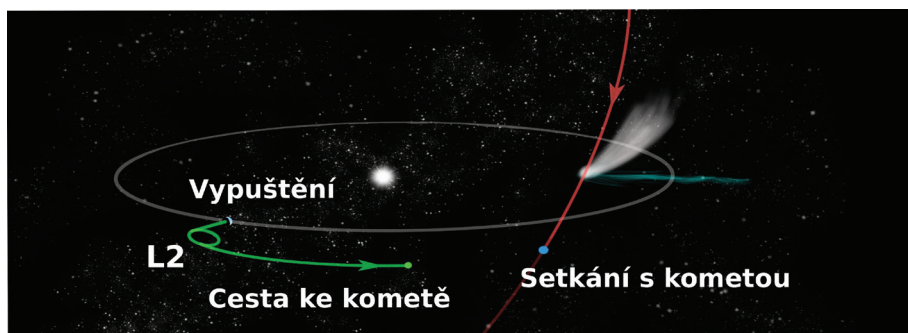
4 Mise Comet Interceptor – čekání na novou kometu

Ivana Kolmašová

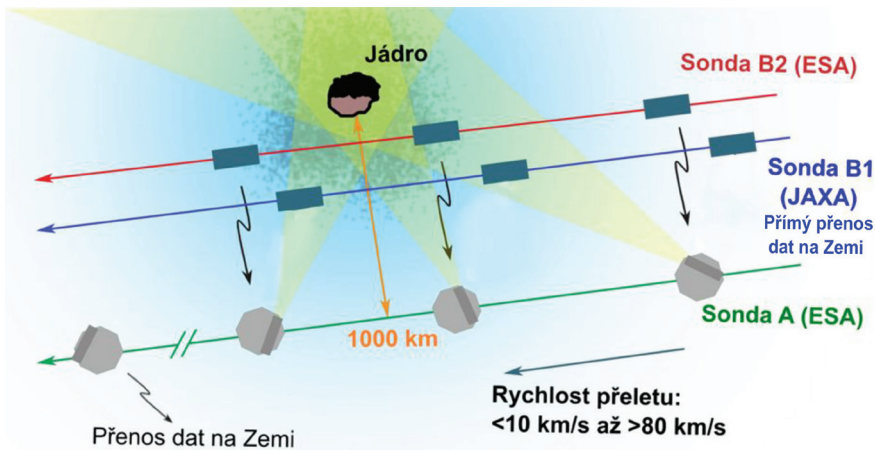
Mise Comet Interceptor byla vybrána ESA v červnu 2019, aby se v roce 2029 jako souputník středně velké evropské mise Ariel vydala do libračního bodu L2 soustavy Slunce–Země a čekala na nedotčenou kometu, která vstoupí poprvé do vnitřní oblasti Sluneční soustavy (**obr. 4.1**). Taková kometu totiž může obsahovat materiál, který se na ní zachoval z doby, kdy se formovala a vyvíjela naše Sluneční soustava.

Všechny komety, které doposud zkoumaly vesmírné sondy, se již mnohokrát přiblížily ke Slunci a jejich povrch prošel změnami, které smazaly jeho původní vzhled. Opravdovou, nedotčenou kometu je třeba teprve najít, potkat a prozkoumat. Takové objekty lze objevit až při jejich prvním přiblížení ke Slunci, takže na plánování a zahájení mise k nim nezbyvá mnoho času. Proto je mise Comet Interceptor značně nezvyklá – je první misí, jejíž cíl zatím ještě nebyl vůbec objeven.

Jediný způsob, jak se setkat s dynamicky novými kometami nebo mezihvězdnými objekty, je objevit je s dostatečným předstihem. Až doposud byla doba mezi objevením komety a jejím příchodem do vnitřní oblasti Sluneční soustavy velmi krátká, trvající jen několik měsíců až rok. Nová generace výkonných dalekohledů, včetně připravovaného Large Synoptic Survey Telescope, dokáže objevit komety s mnohem větším předstihem, ale ten stále ještě není dostatečně dlouhý, aby bylo možné připravit



Obr. 4.1 Schematické znázornění průběhu mise Comet Interceptor. Bod L2 je jedno z tzv. libračních center neboli Langrangeových bodů, definovaných v nebeské mechanice jako místo v soustavě tří těles, v němž se vyrovnávají gravitační a odstředivé síly dvou těles (Slunce a Měsíc) působících na třetí těleso (sonda) tak, že toto relativně lehké těleso umístěné v daném bodě nemění vůči soustavě svou polohu (adaptováno dle Snodgrass a kol., 2019)



Obr. 4.2 Schematické znázornění průběhu mise Comet Interceptor v blízkosti zkoumané komety (adaptováno dle Snodgrass a kol., 2019)

k vypuštění novou vesmírnou misí až po objevu nové komety. Proto bude sonda Comet Interceptor číhat v libračním bodě L2, než bude nasměrována na svůj cíl. Mise Comet Interceptor se skládá ze tří sond; mateřské sondy A a dvou dceřiných sond B1 a B2, které budou propojené do jednoho tělesa čekat měsíce až roky na novou kometu. Pravděpodobně několik týdnů před setkáním s kometou se rozdělí na samostatné sondy se svými přesně definovanými úlohami. Menší dceřiné sondy se dostanou blíže ke kometě a není vyloučeno, že budou měřit jen krátkou dobu a dojde k jejich zničení. Větší mateřská sonda bude měřit od komety dál a bude sloužit také jako komunikační uzel pro dceřinou sondu B2 (**obr. 4.2**).

Nové vědecké cíle

Doposud se ze Země vypravilo deset misí zkoumat osm jednotlivých komet. Zatímco průlet sondy Giotto kolem 1P/Halley byl první misí, která poskytla snímky kometárního jádra s dobrým rozlišením, sonda Rosetta ke kometě 67P/Čurjumov-Gerasimenko byla první misí, která sledovala měnící se aktivitu kometárního jádra před průletem periheliem (nejbližším místem ke Slunci na oběžné dráze) a po něm. Obě mise přinesly obří posun v kometární vědě. Rosetta ukázala, že kometa 67P obsahuje organické látky a má jiný poměr izotopů vody než na Zemi. Díky Rosettě také víme, že je povrchová struktura jádra komety 67P proměnlivá v čase, má výrazně kontrastní oblasti, kterým dominuje eroze prachu, a že vnitřní kóma komety (plynný obal obklopující

jádro komety, jenž se formuje v blízkosti Slunce z uvolněných plynů a prachu) je vysoce dynamické, a mění se v čase a prostoru.

Vědecké výsledky získané misí Giotto zkoumající Halleyovu kometu, Rosettu a Philae, které zamířily ke kometě 67P, a dalších kometárních misí, jsou nezpochybnitelné. Nicméně přinesly další otázky, které může zodpovědět právě jen průzkum nové komety. Primárním vědeckým cílem mise Comet Interceptor je tedy poprvé charakterizovat dynamicky novou kometu včetně tvaru, složení a struktury povrchu jejího jádra. Zajímá nás, jakou měrou je povrch homogenní, z jakých částí je složen, jak je složení povrchu proměnlivé. U plynného obalu se chceme dozvědět, jaké je v něm složení plynu a prachu, jakým způsobem je plynný obal propojen s jádrem a jak interaguje se slunečním větrem. Zkoumání plynného obalu na atomární, molekulární a izotopové úrovni může přinést unikátní a důležité informace o vlastnostech a původu ledu, ze kterého se plynný obal vytvořil. Vědci se také chystají pomocí sondy Comet Interceptor zjistit relativní množství molekul s vysokou těkavostí, jako je CH_4 , CO a CO_2 v plynném obalu nové komety, a výsledky porovnat s měřeními provedenými v podobných heliocentrických vzdálenostech u komet 67P a 1P.

Díky vícebodovému měření bude možné zmapovat neutrální plynný obal a určit rozložení H_2O , CO_2 a CO kolem jádra. Neméně důležité je prozkoumat prachové částice v plynném obalu. Studium vlastností prachu je důležité pro pochopení složení a vzniku komety. Prachová část plynného obalu se skládá z minerálů a organických složek vyzvednutých z povrchu jádra komety. Jejich velikosti mohou být velmi rozdílné: od zrníček menších než tisícina milimetru až po metrové kusy. Zajímá nás jejich morfologie neboli struktura, neboť z měření předcházejících kometárních misí víme, že struktura může být značně rozdílná, zahrnující zrnka s pravidelným či nepravidelným tvarem, fraktální seskupení zrněk či skupiny s porézní strukturou. Prach se z jádra komety šíří směrem od jádra širokými i užšími fokusovanými svazky, jejichž vlastnosti jsou pravděpodobně dány topografií jádra. Úzké svazky jsou viditelné i ze vzdálenosti okolo jednoho tisíce kilometrů od komety. Při pohledu z větších vzdáleností pak uvolněný prach tvoří charakteristický ohon komety.

Dalším neméně důležitým vědeckým cílem je vícebodové měření plazmatického prostředí okolo komety a jeho interakce se slunečním větrem. Neutrální plyn uvolněný z jádra komety se totiž částečně ionizuje tím, že je vystaven jednak slunečnímu ultrafialovému záření a dále také srážkám s energetickými částicemi slunečního větru. Tyto nově zrozené ionty mohou interagovat s kometárními neutrálními atomy či molekulami. V plynném obalu komety pak probíhá bohatá škála chemických reakcí, které produkují nové druhy iontů. Kromě toho se tyto čerstvé kometární ionty dostávají pod vliv magnetického pole, které s sebou sluneční vítr unáší. Ionizovaný plyn pak proudí podle magnetických siločar a zviditelňuje strukturu magnetického pole, čímž tvoří viditelný iontový nebo plazmový ohon. Struktura plazmového ohonu se může měnit na minutových časových škálách.

Pomocí měření na třech platformách mise Comet Interceptor bude možné charakterizovat plazmatické prostředí komety a poprvé detailně prozkoumat vlastnosti hraniční oblasti, kde kometa interaguje se slunečním větrem. Současné tříbodové pozorování by mělo vést ke stanovení trojrozměrné geometrie této hraniční oblasti a ke zmapování pohybu hmoty, přenosu energie a hybnosti ve fascinujícím prostředí plynného obalu komety. Plazmatické prostředí komety tvoří komplexní směs iontů různého druhu, původu a relativních rychlostí, elektronů různých energií, neutrálních molekul a prachových částic různých velikostí a náboje. V tomto prostředí kometárního plazmatu hrají důležitou roli elektromagnetické vlny, které přenášejí energii přes hranice oblasti interakce komety a slunečního větru a prostřednictvím vlnově-částicových interakcí předávají energii jednotlivým populacím částic. Interakce slunečního větru s kometárním plazmatem vede rovněž k nestabilitám, jež dávají vzniknout vlnám různých módů.

Během současného průletu třech sond různými místy plynného obalu získáme unikátní měření, s jehož pomocí budeme moci charakterizovat různé mechanismy interakcí slunečního větru s kometou včetně prozkoumání tzv. diamagnetické dutiny. Tato dutina vzniká u komet s bohatým plynným obalem vlivem interakce se slunečním větrem, bezprostředně obklopuje jádro, postrádá magnetické pole a zabraňuje úplnému pronikání slunečního větru do oblasti nejbližší k jádru.

Tím, že bude Mise Comet Interceptor poprvé pozorovat kometu z různých úhlů, vytvoří se třírozměrný obraz jádra, plynného obalu a interakční oblasti komety se slunečním větrem. Uspořádání tří měřicích sond umožní oddělit časové variace měřených parametrů (vniklé např. kvůli měnící se aktivitě komety) od prostorových (vzniklých např. nehomogenním odplyňováním komety), což nebylo možné v žádné předchozí kometární misi.

Skladba přístrojů hlavní sondy a dceřiných sond

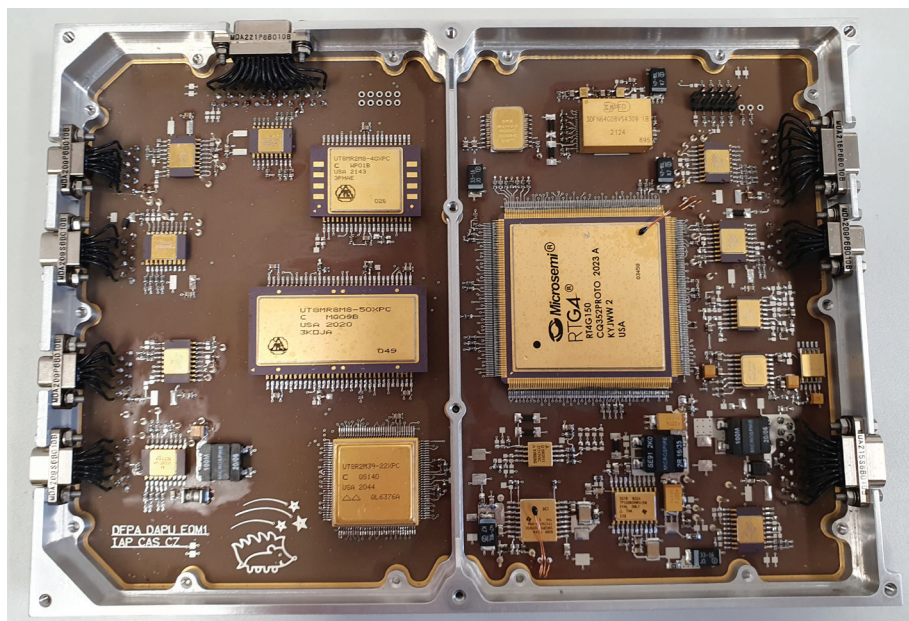
Na větší sondě A (ESA) bude své úlohy plnit kamera pro snímkování jádra komety s vysokým rozlišením na několika vlnových délkách, hmotnostní spektrometr pro analýzu plynů uvolněných z jádra komety, infračervený spektrometr pro měření tepelného záření uvolňovaného z jádra komety a přístroj na měření molekulárního složení plynného obalu. Nejkomplexnějším přístrojem je jednotka pro měření vlastností plazmatu, energií částic, měření magnetických polí a detekci prachu.

Na sondě B1 (za kterou odpovídá japonská kosmická agentura, JAXA) se sada přístrojů skládá z ultrafialové kamery určené pro studium oblaku plynného vodíku obklopujícího jádro, plazmového přístroje pro analýzu nabitých plynů a magnetického pole v blízkém okolí komety a širokouhlá kamera pro snímkování jádra ve velkém rozlišení v době největšího přiblížení ke kometě.

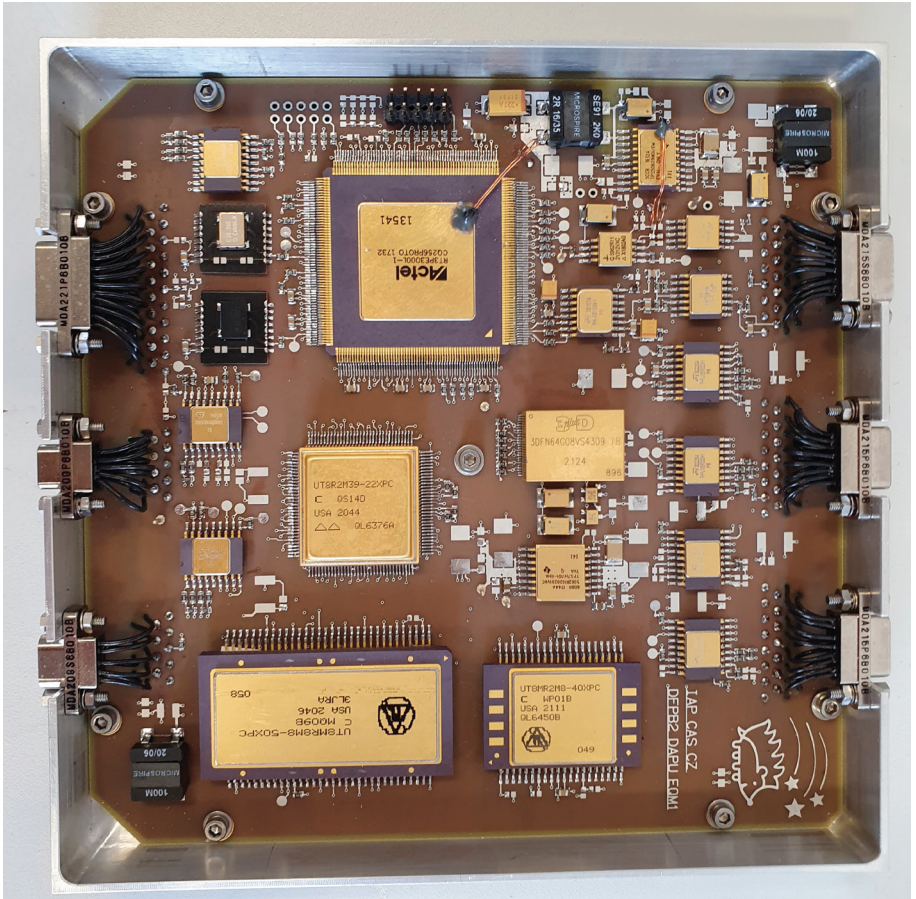
Sonda B2 (ESA) ponese na své palubě kameru pro mapování jádra a jeho prachových výtrysků na různých viditelných a infračervených vlnových délkách, celooblohovou kameru snímající jádro a blízký ohon komety s cílem zmapovat měnící se strukturu prachu, neutrálního plynu a ionizovaných plynů a jednotku pro měření magnetických polí, plazmatu a detekci prachu obklopujících kometu.

Český příspěvek k misi Comet Interceptor

V nejkompaktnějším měřicím zařízení sond mise Comet Interceptor, kterým je přístrojová sada pro měření prachu, polí a plazmatu DFP (Dust, Field and Plasma) pro sondu A, našly své místo také české analyzátoři. Přístrojová sada DFP-A má za úkol zmapovat prachové a ionizované oblasti v okolí komety, charakterizovat jejich vlastnosti a zkoumat procesy probíhající na iontových a elektronových škálách. K tomuto

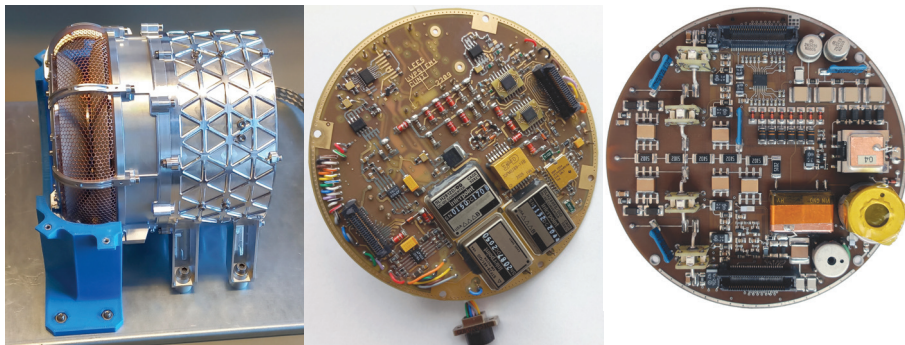


Obr. 4.3 Kvalifikační model analyzátoru DAPU-A. Tento prototyp je velmi podobný letovému modelu a je určen pro intenzivní testování funkčnosti analyzátoru včetně vibračních testů, testů elektromagnetické kompatibility a testů funkčnosti ve vakuu a ve velkém rozsahu teplot (foto R. Lán, ÚFA AV ČR)



Obr. 4.4 Kvalifikační model DAPU-B2 (foto R. Lán, ÚFA AV ČR)

účelu se přístrojová sada DFP-A skládá z analyzátoru prachu a řídicí jednotky celé přístrojové sady, senzoru měřícího vlastnosti prachových částic o rozměrech od 1 do 200 μm , tříosého senzoru pro měření vektoru stejnoměrného magnetického pole umístěného na vyklápěcí tyči, senzoru určeného k detekci elektronů a dalších záporně nabitých částic v rozmezí energií 1–1000 eV a senzoru určeného k detekci iontů s poměrem váhy a náboje 1, 2, 4, 8, 16, 32 a energiemi od 10 eV do 15 keV, který bude také detekovat neutrální atomy v rozmezí energií od 300 eV do 3 keV. K přístrojové sadě DFP-A ještě patří analyzátor s příslušnými anténami pro měření elektrických polí a vlastností plazmatu. Přístrojová sada DFP-B2 (pro sondu B2) je zjednodušená



Obr. 4.5 Vlevo: Mechanická konstrukce elektronového spektrometru; uprostřed: deska elektroniky komunikující s řídicí jednotkou přístrojové sady DFP, která zároveň vytváří napájecí napětí pro senzor LEES a monitoruje napětí, proudy a teploty v senzoru. Kontroluje také příkon vyhřívací jednotky zabudované v senzoru. Vpravo: deska elektroniky generující statická a proměnná vysoká napětí pro senzor. Zdroj napětí má vysokou účinnost, malé rušení a dobrou stabilitu výstupního napětí (foto L. Přech, MFF UK)

verze přístroje pro hlavní sondu a sestává pouze z řídicí jednotky, magnetometru a senzoru prachu.

ÚFA vyvíjí pro sondy A a B2 mise Comet Interceptor desky elektroniky DAPU-A (**obr. 4.3**) a DAPU-B2 (**obr. 4.4**), přičemž DAPU znamená Dust Analyzer & Processing Unit. Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy vyvíjí elektronické desky částicového detektoru LEES (Low-Energy Electron Spectrometer, **obr. 4.5**). Obě desky detektoru LEES jsou vysoce miniaturizované s průměrem běžného DVD, dovolující snížit váhu celého senzoru na 1,3 kg při příkonu pod 2 W. Desky plošných spojů budou osazovat kvalifikovaní pracovníci firmy G. L. Electronics z Brna. Náklady na vývoj a stavbu českých přístrojů jsou financovány z českého příspěvku do ESA programu PRODEX.

Rozšiřující čtení

Snodgrass, C., Jones, G. H. The European Space Agency's Comet Interceptor lies in wait. *Nat Commun* **10**, 5418 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13470-1>.

5 Sonda k Venuši – EnVision

Petr Brož, Martin Ferus

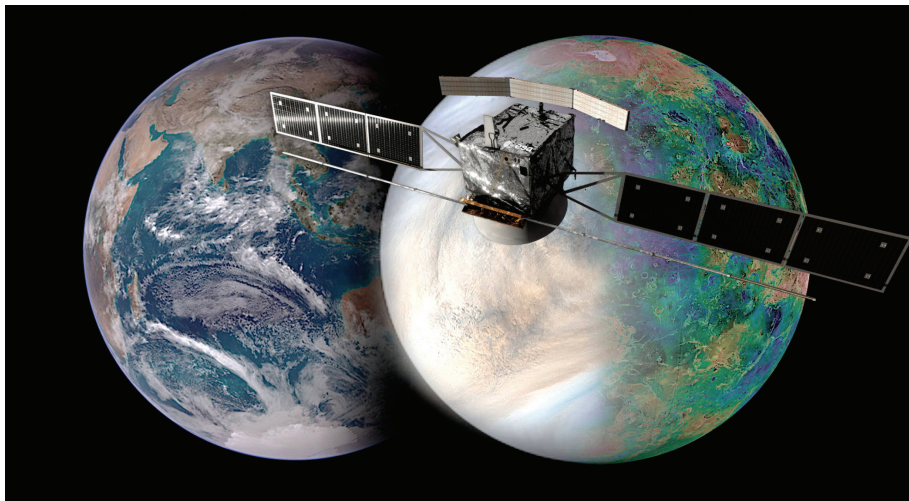
V roce 2021 ESA ohlásila, že se chystá vrátit zpátky k Venuši. K pekelnému dvojčeti Země, které skrývá klíč k pochopení toho, co se stane s planetou, jež přestane zvládat hospodaření se svými skleníkovými plyny. K realizaci totiž byla vybrána sonda EnVision, která by se – pokud vše půjde podle plánu – měla vydat na cestu k Venuši v roce 2031.

Předchozí výzkum Venuše

Dokud nepřišel kosmický věk, o Venuši jsme věděli jen málo: že je podobně velká jako Země a že se kolem ní nachází atmosféra s mračky. Domnívali jsme se, že jelikož je blíže ke Slunci než Země, bude na nás pod mračky čekat tropický ráj. Šeredně jsme se ale mýlili. Namísto ráje tam čekalo peklo. Teplota povrchu totiž dosahuje přes 460 °C, a je tedy dostatečně vysoká, aby se tavilo olovo. V horních vrstvách atmosféry pak prší kapky kyseliny sírové a povrch je svírán enormním atmosférickým tlakem, který odpovídá jednomu kilometru vodního sloupce. Navíc se v atmosféře nachází vrstvy mračen, která se nikdy nerozptýlí. Na povrchu Venuše tak panuje výrazné a nikdy nekončící šero. Povrch Venuše je proto nehostinným místem pro výskyt kapalné vody, natož pak pro život.

Je to přitom hustá atmosféra se svými vrstvami mračen, která nám zabraňuje v pozorování povrchu ve viditelné části spektra. Proto jsme první poznatky o vzhledu povrchu Venuše získali až začátkem šedesátých let 20. století díky rozvoji radarové astronomie. Ta umožnila proniknout atmosférou a spatřit povrch skrze radarové odrazy. Na radarové signály jsou totiž mračka krátká. Procházejí jimi, dopadají na povrch a následně se od povrchu odrážejí zpět. Na snímcích byly rozeznatelné 3 oblasti s vysokou odrazivostí radarových vln – dnes označované jako Maxwell Montes, Alpha a Beta Regio –, to bylo ale na dlouhou dobu v podstatě vše, co jsme o struktuře povrchu znali.

Na další podrobnosti jsme si museli počkat do doby, kdy k Venuši dorazila řada planetárních sond Veněra. Velkým krokem vpřed bylo dosednutí dvojice sovětských sond Veněra 9 a 10 na povrch Venuše v roce 1975. Díky černobílým fotografiím jsme poprvé spatřili povrch přímo. Současně jsme se dozvěděli i složení hornin v místě přistání – sondy totiž měly na své palubě hmotnostní spektrometr k analýze hornin. Zjistili jsme, že povrch v okolí sondy utváří 30 až 40 centimetrů velké tmavé kameny vzhledem i chemickým složením odpovídající pozemským bazalovým lávovým proudům. Až do roku 1978 jsme ale tápali, jak vypadá povrch v širší

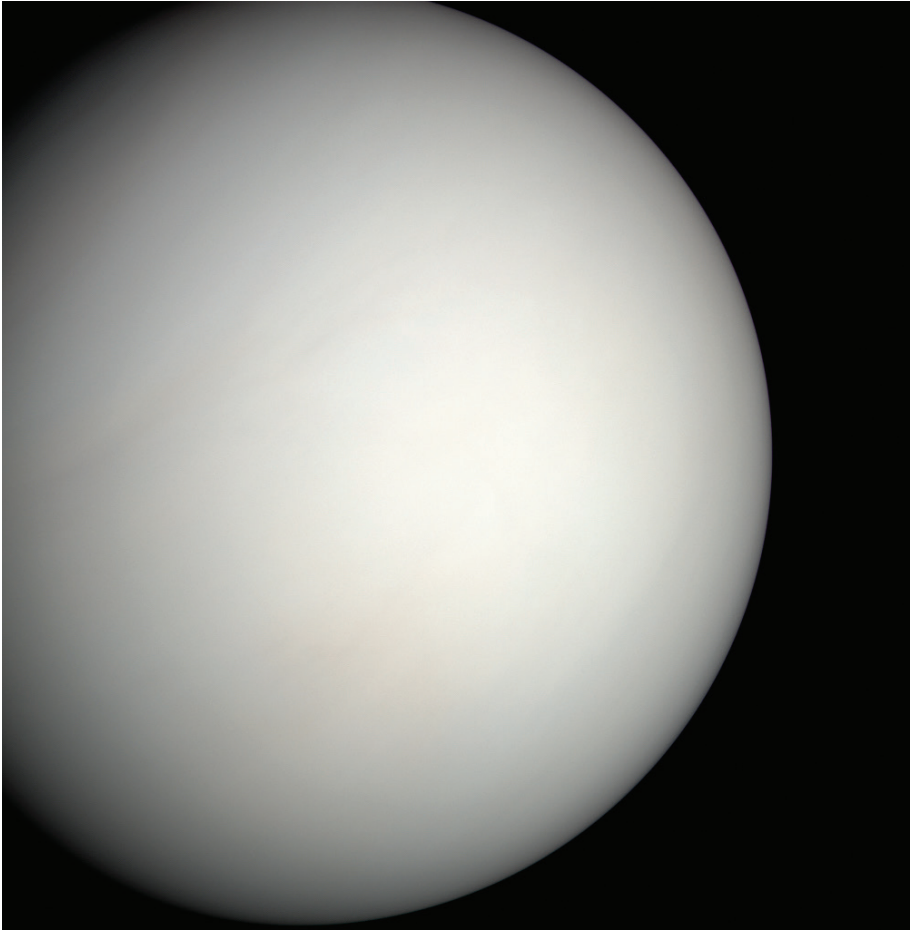


Obr. 5.1 Umělecká představa mise EnVision společně se Zemí (vlevo) a Venuší (vpravo) v nepravých barvách. (zdroj: NASA / JAXA / ISAS / DARTS / Damia Bouic / VR2Planets)

perspektivě. Sovětské sondy Veněra totiž poskytly pohled jen na malou část Venuše – pouze na místo přistání. Nebylo však jasné, jestli jsou údaje reprezentativní i pro zbytek planety.

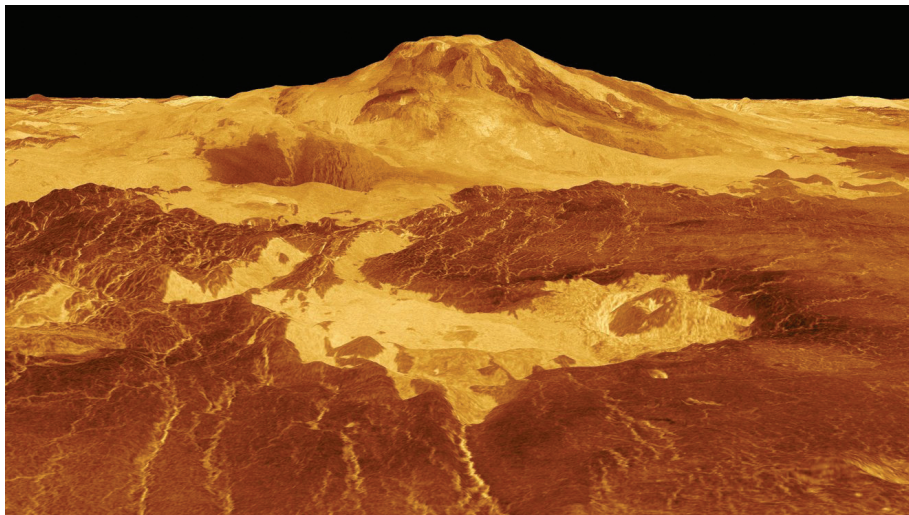
Tuto nejistotu částečně vyřešila americká sonda Pioneer Venus Orbiter, která s pomocí radaru pořídila první globální údaje o topografické výšce a tepelné emisivitě povrchu, bohužel v nízkém rozlišení. Rozpoznat se daly pouze útvary o velikosti řádu stovek kilometrů. Další pokrok přinesl rok 1983, kdy byly na oběžnou dráhu Venuše navedeny sondy Veněra 15 a 16, které s pomocí radaru pronikly skrze mračna a zmapovaly v lepším rozlišení část severní polokoule. Potvrdily nám, že povrch tvoří rozsáhlé hladké pláně, které jsou narušované kuželovitými horami a rozsáhlými trhlinami. Navíc bylo možné u řady hor pozorovat, jak se z jejich úbočí rozlévají do vzdálenosti desítek až stovek kilometrů proudy materiálu opět podobného bazaltovým lávovým proudům na Zemi. Jenže celý povrch jsme stále nespatriili.

K obrovskému skoku vpřed došlo v 90. letech 20. století, kdy byla na oběžnou dráhu Venuše navedena americká sonda Magellan. Ta byla vybavena výkonným radarem, s jehož pomocí se podařilo zmapovat téměř celý povrch planety. A to v mnohem lepším rozlišení, než poskytly předchozí sondy. Najednou jsme měli k dispozici nejen detailní znalosti o vzhledu povrchu a jeho topografii, ale také částečně o vlastnostech hornin, které ho tvoří. Paradoxně jsme tak věděli o povrchu Venuše více, než jsme věděli o vzhledu oceánského dna na Zemi.



Obr. 5.2 Pohled na Venuši v pravých barvách pořízený americkou sondou Messenger během těsného průletu v roce 2008. Na snímku je dobře patrné, že je celý povrch Venuše skryt pod hustou vrstvou mračen, která se nikdy nerozptýlí, a která nám tak ztěžují průzkum tohoto fascinujícího světa (zdroj: NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Carnegie Institution of Washington)

Spatřili jsme, že se na povrchu nachází nejen stovky sopek nejrůznějších tvarů a velikostí, ale i nekonečné hladké pláně tvořené ztuhlými lávovými proudy. Nebylo pochyb, Venuše je sopečným světem. K našemu překvapení však na Venuši i něco chybělo – větší množství velkých impaktních kráterů. Ty přitom vznikají srážkami



Obr. 5.3 Počítačem generovaný 3D model povrchu Venuše založený na radarových datech pořízených americkou planetární sondou Magellan. Snímek zachycuje Maat Mons, obrovskou štítovou sopku, která by mohla být stále sopečně aktivní (zdroj: NASA / JPL-Caltech)

okolo letících objektů s planetou a platí, že čím více jich na tváři tělesa je, tím je povrch starší. Magellan nám odhalil, že došlo k něčemu velkolepému. Před 300 až 750 miliony let byl starý kamenitý povrch nahrazen povrchem novým. Naše podezření samozřejmě okamžitě padlo na všudypřítomné sopky. Nemohla by sopečná činnost zaplavit nebo opakovaně zaplavovat většinu povrchu lávou? A pokud ano, nemohlo by k tomu dojít zase? Výzkum chemického složení atmosféry Venuše prováděného mezi roky 2006 a 2015 evropskou sondou Venus Express navíc odhalil vysoký poměr izotopů vodíku (izotopy jsou atomy o stejném počtu protonů, ale různém počtu neutronů). Ten je až 250krát vyšší, než je v atmosféře Země. To ukazuje, že před dávnými časy musela Venuše mít i spousty vody! Jak moc? Nevíme. Možná tolik, že povrch kdysi omýval oceán. Další vědecké záhady byly na světě.

Hned jsme proto začali pátrat po důvodu, proč se tyto dva světy (Země a Venuše) natolik liší. Sopečná činnost byla od počátku jednou z podezřelých. Její výrazná činnost by tak dokázala vysvětlit přítomnost nesmírně husté atmosféry tvořené téměř výhradně oxidem uhličitým. Na Zemi jsou to totiž právě aktivní sopky, které jsou schopny velké množství tohoto skleníkového plynu vypouštět do atmosféry. Je tomu tak i na Venuši? Bohužel nevíme. Radarové snímky ze sondy Magellan neměly takové rozlišení, aby přítomnost aktivních sopek ukázaly. Stále tak dnes netušíme, co stálo

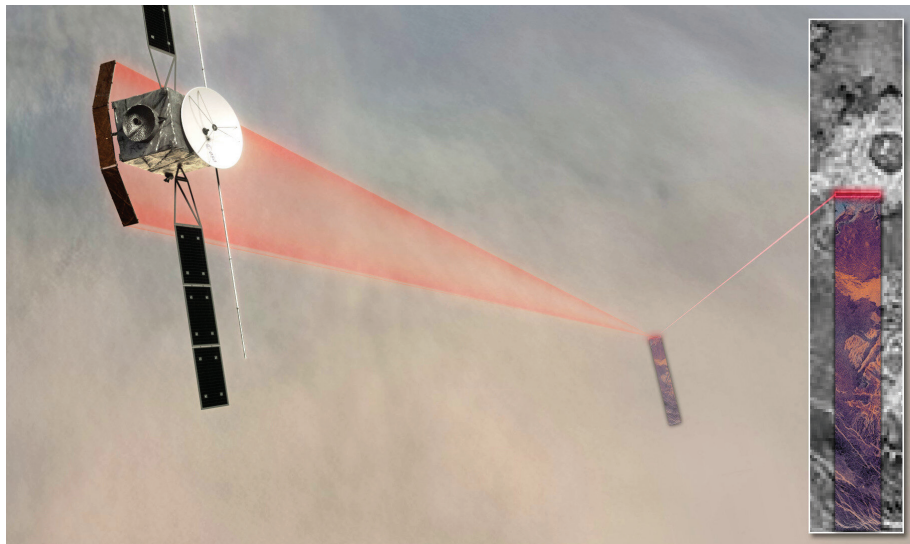
za přeměnou Venuše ve skutečný předobraz pekla. Přitom ale platí, že před miliardami let tomu tak být nemuselo a planeta mohla vypadat mnohem více jako Země. Možná i po dobu několika miliard let, jenže pak se v jejím vývoji něco zvrtno. A kdo ví, třeba mohla mít dlouhodobě i podmínky vhodné pro rozvoj života.

EnVision přichází na scénu

Předchozí sondy nedokázaly poskytnout pozorování, která by na tyto záhady poskytla jednoznačné odpovědi. Vědecká komunita proto už přes dvě desetiletí argumentovala, že je potřeba k Venuši vyslat novou sondu poskytující detailnější vhléd na tento fascinující svět. Když ESA v roce 2021 tato volání vyslyšela a v rámci projektu středně velkých evropských sond vybrala k realizaci misi EnVision, zavládlo v komunitě nadšení. Vybrána byla totiž sonda, která se svou paletou vědeckých přístrojů umožní otázky spjaté s vývojem Venuše zodpovědět.

Až sonda k našemu pekelnému dvojčeti vyrazí, bude mít velikosti $2 \times 2 \times 3$ metrů (sonda po vypuštění naroste po roztažení dvojice fotovoltaiických panelů zásobujících ji elektřinou) a hmotnosti okolo 2,5 tuny (při startu). Na své palubě ponese několik zařízení. Konkrétně se bude jednat o VenSAR dodaný americkou NASA, tedy o dvoupolarizační radar operující v tzv. frekvenčním pásmu S, který bude fungovat i jako mikrovlnný radiometr a výškoměr. S jeho pomocí bude zmapován celý povrch planety. Dále se na palubě bude nacházet trojice spektrometrů (VenSpec-M, VenSpec-U a VenSpec-H) určených k průzkumu složení různých vrstev atmosféry Venuše a samotného povrchu. Sada spektrometrů VenSpec tak umožní získat globální mapy emisivity povrchu v šesti pásmech vlnové délky, a to za pomoci spektrální průhlednosti v blízké infračervené oblasti noční atmosféry. Podrobná okna jsou následující: (1) 1,16 až 1,19 μm (H_2O , HDO ve výšce 0–15 km); (2) 1,72 až 1,75 μm (H_2O , HCl ve výšce 15–25 km); (3) 2,29 až 2,48 μm (H_2O , HDO, HF, CO, COS, SO_2 ve výšce 30–40 km). Sonda ale také ponese dvojici penetračních radarů operujících na různých frekvencích, které dovolí prozkoumat oblasti pod povrchem do hloubky jednoho kilometru. Výsledky z mikrovlnného radiometru ve spolupráci s pozemskou sítí radioteleskopů pak umožní též detailně zmapovat gravitační pole Venuše a tím lépe prozkoumat její vnitřní stavbu i pohyb vzduchových mas v její atmosféře.

Když se podíváme na vybavení sondy, je zřejmé, že jedním z hlavních úkolů sondy EnVision bude prozkoumat za pomoci radarů povrch, a to mnohem podrobněji, než dokázala sonda Magellan. Rozlišení radarových snímků by mělo být tentokrát natolik podrobné, že bychom měli spatřit drobné změny povrchu vlivem sopečné i tektonické aktivity. Konečně bychom se proto mohli dozvědět, jestli jsou na Venuši aktivní sopky a jak často soptí. EnVision navíc bude umět i něco dalšího. Za pomoci spektrometru VenSpec-M dokáže totiž prozkoumat chemické složení hornin, abychom se mohli



Obr. 5.4 Umělecká představa sondy EnVision studující povrch Marsu za pomoci zařízení VenSAR a penetračního radaru SRS, což umožní odhalit tvar povrchu, ale i nahlédnout pod něj. Cílem je odhalit, jestli jsou na Venuši stále aktivní sopky a jak často případně dochází k sopečné činnosti (zdroj: ESA / Paris Observatory / VR2Planets / Damia Bouic)

dozvědět, z čeho je povrch tvořen. To nám pomůže lépe zodpovědět otázku, co povrch přetvořilo, a tím pochopit, jak je možné, že planeta dokáže během relativně geologicky krátkého časového úseku zcela změnit svou tvář.

Jenže tohle je jen jedna strana ve výzkumu Venuše. Nejnovější objevy totiž jasně ukazují, že děje v nitru planety a vývoj její atmosféry jsou vzájemně propojeny. Je tedy potřeba studovat atmosféru, povrch Venuše i její nitro jako jeden celek. Proto má sonda vyjma penetračních radarů na své palubě spektrometry, které se zaměří na výzkum složení nesmírně husté atmosféry. Spektrometr VenSpec-H by tak měl umožnit analýzu noční atmosféry při povrchu a denní mapování atmosféry nad neustále přítomnou oblačností a tím pomáhat zmapovat plyny, které se v atmosféře nacházejí. Na základě získaných dat by se mohlo podařit rozklíčovat, co se na Venuši stalo, že se hospodaření se skleníkovými plyny vymklo planetě z rukou, což zapříčinilo nesmírně silný skleníkový jev. Nicméně kromě toho spektrometr VenSpec-U umožní též pátrat po výskytu oxidu siřičitého a vodní páry, což jsou na Zemi dva významné plyny vypouštěné do atmosféry během sopečné činnosti. Jejich mapováním tak bude možné zodpovědět otázku, jestli je Venuše stále sopečně aktivní, případně jak moc a kde k výstupu magmatu konkrétně dochází.

A je to právě jeden z trojice výše zmiňovaných spektrometrů, konkrétně VenSpec-H, ve kterém budeme mít českou stopu. Konsorcium tvořené českými vědci z Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, Geofyzikálního ústavu AV ČR a České geologické služby bude stát za výrobou a testováním kompletní řídicí elektroniky pro tento spektrometr v rámci projektu podpořeného programem PRODEX.

Rozšiřující čtení

Podrobná specifikace spektrometru VenSpec-H – <https://sites.lesia.obspm.fr/envision/envision-venspec-h/> (anglicky).

Podrobná specifikace spektrometru VenSpec-U – <https://sites.lesia.obspm.fr/envision/envision-venspec-u/> (anglicky).

Podrobná specifikace spektrometru VenSpec-M – <https://sites.lesia.obspm.fr/envision/envision-venspec-m/> (anglicky).

Podrobná specifikace radaru VenSAR určeného pro detailní průzkum povrchu Venuše – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030324341730034X> (anglicky).

6 Gravitační laboratoř LISA

Jiří Svoboda, Ondřej Zelenka

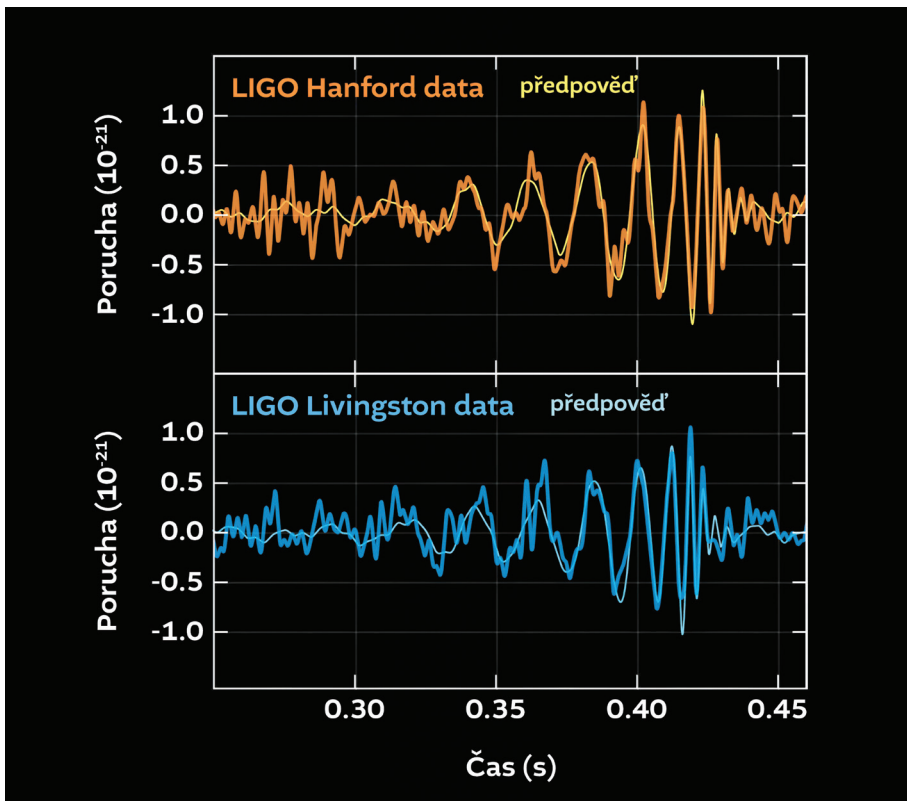
Gravitační vlny a cíle mise LISA

Po mnoho století spoléhali astronomové na pozorování nebeských těles prostřednictvím viditelného světla, ať pozorováním pouhýma očima, nebo později s použitím dalekohledů. S rozvojem technologií přibýly další metody, například pozorování v rádiovém, infračerveném, ultrafialovém či rentgenovém oboru elektromagnetického spektra nebo detekce kosmických částic. Nejnovější okno do vesmíru se otevřelo detekcí gravitačních vln, které již ve své teorii relativity předpověděl Albert Einstein v roce 1916. Jedná se o formu záření zprostředkovanou gravitačním polem, která se šíří vesmírem rychlostí světla. Zároveň jejich intenzita opadá pomaleji než u elektromagnetických vln, a proto nám mohou umožnit dohlédnout velmi daleko, tedy i do dávné historie našeho vesmíru.

Gravitační vlny při svém šíření roztahují a zkracují prostor, což umožňuje jejich detekci pomocí tzv. interferometrů, které sledují šíření laserového paprsku vakuovou trubicí v navzájem kolmých směrech. Paprsky cestující dvěma rameny detektoru se po odrazu zrcadlem na konci vrací na počáteční místo, kde se spojí a změří se výsledná intenzita. Základní nastavení je takové, že se paprsky potkávají v opačné fázi a oba signály se tak vzájemně vyruší. Prochází-li však detektorem dostatečně silná gravitační vlna, výsledná intenzita se v čase začne měnit v souvislosti se změnami délek ramen v důsledku procházející gravitační vlny.

Takto byly gravitační vlny poprvé přímo pozorovány 14. září 2015, kdy detektory LIGO ve Spojených státech zaznamenaly signál odpovídající srážce dvou černých děr o hmotnostech přibližně 36krát a 29krát vyšších než naše Slunce. K této události došlo před 1,3 miliardy let, tedy v době, kdy se na Zemi ještě nevyskytovaly žádné mnohobuněčné organismy. Zachycená maximální změna vzdálenosti ve 4 km dlouhém ramenu odpovídala pouhé tisícině velikosti protonu. Stalo se tak na nepatrný zlomek vteřiny, jak je vidět na **obrázku 6.1**. Frekvence a amplituda oscilací se zvyšovaly, jak se černé díry k sobě přibližovaly před finálním splynutím, po kterém již následoval dozvuk a utlumení. Aby bylo zřejmé, že se jedná o poruchu způsobenou gravitační vlnou přicházející z vesmíru, a ne z blízkého okolí, bylo potřeba měření na dvou stanicích ve velké vzdálenosti od sebe. Obě zachycené křivky jsou po korekci na orientaci detektoru zcela totožné, jen nepatrně posunuté v čase, jak se gravitační vlna šířila rychlostí světla.

Dne 17. srpna 2017 pak došlo k další významné detekci, kdy se srazily dvě neutronové hvězdy. To bylo důležité zejména pro potvrzení, že LIGO detekuje skutečné gravitační vlny. Na rozdíl od srážky dvou černých děr, kdy se neočekává žádné

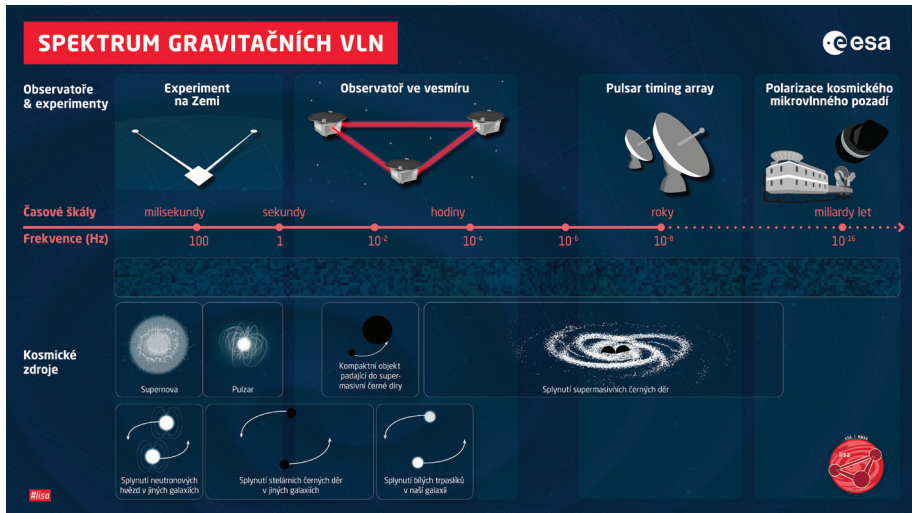


Obr. 6.1 První signál gravitačních vln zachycený observatoří LIGO na dvou stanicích (Hanford a Livingston). Data je proložena teoretická křivka odpovídající srážce dvou černých děr o hmotnosti 29- a 36násobku hmotnosti Slunce (zdroj: LIGO konsorcium)

doprovodné elektromagnetické záření, u srážky neutronových hvězd bylo možné celou událost potvrdit klasickými pozorováními pomocí několika pozemních i kosmických observatoří.

V následujících letech detektory LIGO pozorovaly již téměř sto srážek černých děr o hmotnostech v řádu desítek hmotností Slunce. Dále zaznamenaly dvě srážky neutronových hvězd a umožnily nám tak v reálném čase sledovat vznik těžkých chemických prvků. Jak ukazují nejnovější simulace, nejtěžší prvky na Zemi, jako je zlato, mají svůj původ při srážkách neutronových hvězd, tzv. kilonov.

Fakt, že v detekci převažují černé díry, souvisí s citlivostí detektoru na určité frekvenci. Podobně jako se elektromagnetické záření dělí podle frekvence na různá pásma



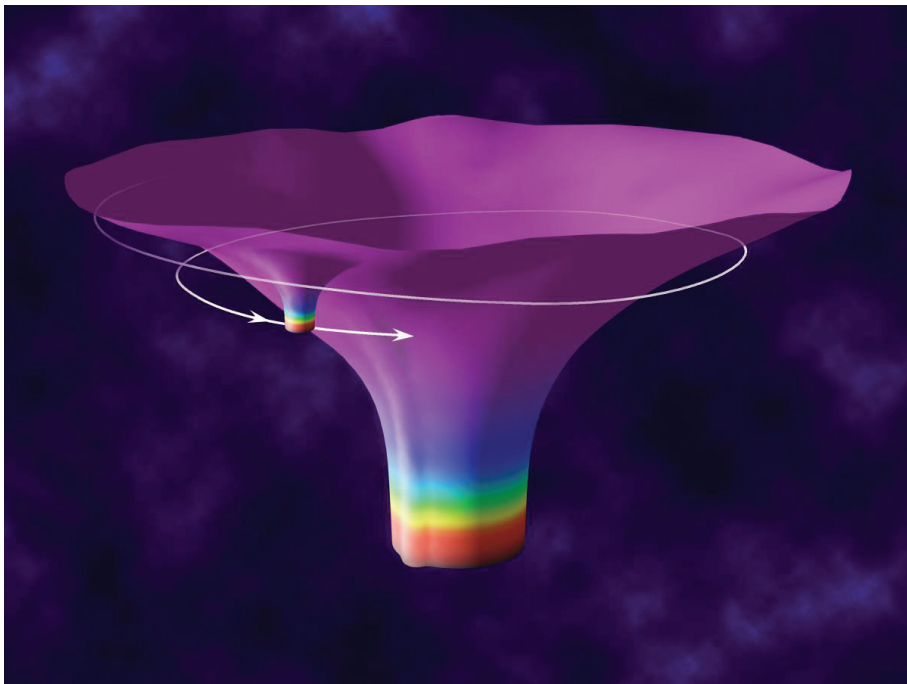
Obr. 6.2 Spektrum gravitačních vln. Vodorovná osa ukazuje typické frekvence nebo obráceně charakteristické časové škály, na kterých dochází k astrofyzikálním jevům uvedeným ve spodním panelu. V horním panelu jsou pak schematicky znázorněny odpovídající detektory (zdroj: ESA)

(např. rádiové vlny, viditelné světlo či rentgenové záření), je tomu tak i u gravitačních vln. Frekvence vln závisí na fyzikálních vlastnostech zdroje: srážka dvojice černých děr hvězdných hmotností (tedy v rozsahu 5 až 50 slunečních hmotností) se silně projeví v rozsahu 10–1000 Hz, ve kterém jsou citlivé současné detektory LIGO ve Spojených státech, Virgo v Itálii či KAGRA v Japonsku.

Na druhou stranu, například dřívější stadia srážek těchto systémů nebo srážka dvojice superhmotných černých děr (v řádu milionů hmotností Slunce) mají znatelně nižší frekvence, typicky do 1 Hz. Délka ramen je úzce spjata s frekvenčním pásmem, ve kterém je detektor nejcitlivější. Na vzdáleném konci spektra, na frekvencích v řádu desítek nHz, operují takzvané Pulsar Timing Arrays (PTAs), které velmi přesně měří intervaly mezi pulzy vzdálených neutronových hvězd, a tím efektivně tvoří detektor gravitačních vln s „rameny“ o délce až tisíců světelných let. Tyto experimenty již měřeními potvrdily existenci stochastického pozadí tvořeného mnoha překrývajícími se signály, které nejspíš pocházejí z navzájem se obíhajících superhmotných černých děr.

Právě na detekci srážek superhmotných černých děr se zaměří plánovaná mise LISA (Laser Interferometer Space Antenna).⁴ Jedná se o detektor gravitačních vln ve

⁴ <https://www.lisamission.org/>.



Obr. 6.3 Schematické znázornění gravitačních polí při oběhu kompaktního objektu (stelární černé díry nebo neutronové hvězdy) okolo superhmotné černé díry (zdroj: NASA)

vesmíru o délce ramen v řádu milionu kilometrů citlivý v rozsahu od 0,1 mHz do 100 mHz. V tomto pásmu bude zaznamenávat srážky černých děr o hmotnostech od desíti tisíc až po miliony slunečních hmotností. Zachytí tak splynutí superhmotných černých děr, ke kterým došlo před mnoha miliardami let, a tím nám dovolí nahlížet do doby, kdy vznikaly první galaxie v našem vesmíru. Tyto poznatky povedou k zodpovězení klíčových otázek současné kosmologie: Kdy a jak vznikly první černé díry? Jak jsou černé díry a jejich srážky spojeny s vznikem a vývojem galaxií? Jakým mechanismem vznikají superhmotné černé díry o miliardách hmotností Slunce a jak se jim podařilo vyrůst již v raném stadiu vesmíru?

Ve stejném frekvenčním rozsahu pak bude možné sledovat měsíce trvající oběh stelárních černých děr a neutronových hvězd okolo superhmotných černých děr i jejich konečný přechod přes horizont událostí. Jejich pozorování nám odhalí nejen poznatky o složení jader galaxií, ale i základních přírodních zákonech. Sledováním až statisíců oběhů těchto systémů, zvaných Extreme Mass Ratio Inspirals (EMRI), viz **obrázek 6.3**, lze mapovat gravitační pole superhmotných černých děr a případně v něm

nalézt odchylky od předpovědí Einsteinovy teorie relativity. Tyto jevy lze pozorovat pouze v blízkosti velmi hmotných těles a není možné je reprodukovat v žádném experimentu na Zemi. Jedná se tedy o jedinečné laboratoře velmi silných gravitačních polí.

Dalším cílem mise bude pozorování velmi kompaktních dvojhvězd, které nám odhalí některá tajemství životního cyklu hvězd. V neposlední řadě bude LISA hledat signály stochastického pozadí tvořeného zatím neznámými fyzikálními jevy v raném vesmíru. Pokud LISA zaznamená takové signály, bude mít tento objev zásadní dopad jak na kosmologii, tak na částicovou fyziku.

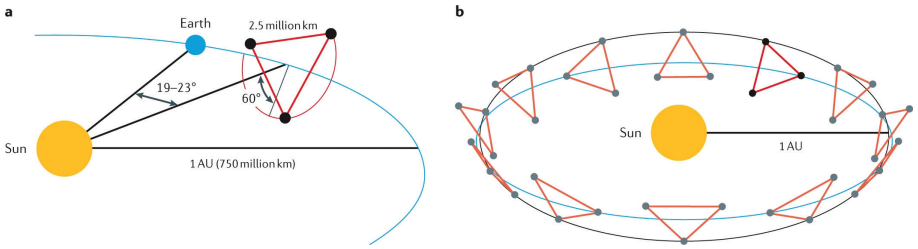
Koncept mise LISA a český příspěvek

Observatoř LISA se bude skládat ze tří sond, které se budou pohybovat po heliocentrických drahách kolem Slunce a vytvoří téměř rovnostrannou trojúhelníkovou soustavu, jejíž strany budou v průměru dlouhé 2,5 milionu km a úhly se nebudou měnit o více než jeden stupeň. V každém satelitu se budou volně vznášet tzv. testovací hmoty (test masses), což budou kostky ze zlata a platiny s délkou hrany asi 5 cm. Gravitační vlny pak budou detekovány jako nepatrné změny vzdálenosti testovacích hmot vůči sobě pomocí laserové interferometrie.

Sondy LISA se budou pohybovat za Zemí ve vzdálenosti 50 až 65 milionů km od Země (**obr. 6.4**). Start sondy LISA je naplánován na rok 2035. Očekává se, že po svém vypuštění dorazí sondy na své operační pozice přibližně za 15 měsíců a mise by měla trvat minimálně 4 roky s možností prodloužení až na 10 let.

Vzhledem k velké vzdálenosti mezi jednotlivými satelity je jednou z klíčových technologií mise správné nasměrování laserového paprsku. K tomu budou sloužit mechanismy na optické lavici. Prvním typem mechanismu bude tzv. Fibre Switching Unit Actuator (FSUA). Každý satelit bude mít dva páry laserových zdrojů. Dva jsou z důvodu směřování na jednu nebo druhou družici a v páru budou z důvodu redundance. Kdyby jeden ze zdrojů selhal, bude tam vedle druhý zdroj. Přepínání mezi laserovými zdroji se bude provádět pomocí půlvlnné destičky $\lambda/2$, která otáčí polarizaci přicházejícího svazku. Otáčením této destičky a kombinací různých polarizací příchodících paprsků a polarizačních filtrů na výstupu lze efektivně vybrat, který z paprsků bude použit dál v aparatuře. Kromě toho jsou obě optické lavice na každé kosmické sondě propojeny optickým vláknem, aby bylo možné porovnat fázi světla vyslaného na každém rameni. Tato tzv. back-link vlákna také potřebují vhodnou úroveň redundance a ta se bude pravděpodobně realizovat pomocí stejného mechanismu.

Vývoj a výroba těchto mechanismů a řídicí elektroniky k nim i dalším mechanismům, které budou dále směřovat a korigovat laserový paprsek na jeho cestě k druhému satelitu, je předmětem českého hardwarového zapojení, které ve spolupráci zajišťují čtyři ústavy AV ČR (ASU, FZU, ÚFA, ÚT) s podporou programu PRODEX. Čeští vědci



Obr. 6.4 Koncept mise LISA a její oběžná dráha (zdroj: LISA konsorcium)

se také aktivně účastní vědecké přípravy mise, zejména počítáním tzv. waveforms (vlnové formy) pro různé popisy prostoročasu a různé poměry hmotností obíhajících kompaktních objektů.

Dodatečná četba v anglickém jazyce

LISA Definition Study Report, ESA-SCI-DIR-RP-002, arXiv: 2402.07571.

Moore, C. J. et al., 2015, *Class. Quantum Grav.* **32**, 015014.

Babak, S. et al., 2017 *Phys. Rev. D* **95**, 103012.

Bartolo, N. et al., 2016 *JCAP* **12**, 026.

7 Horký a energetický vesmír

Jiří Svoboda

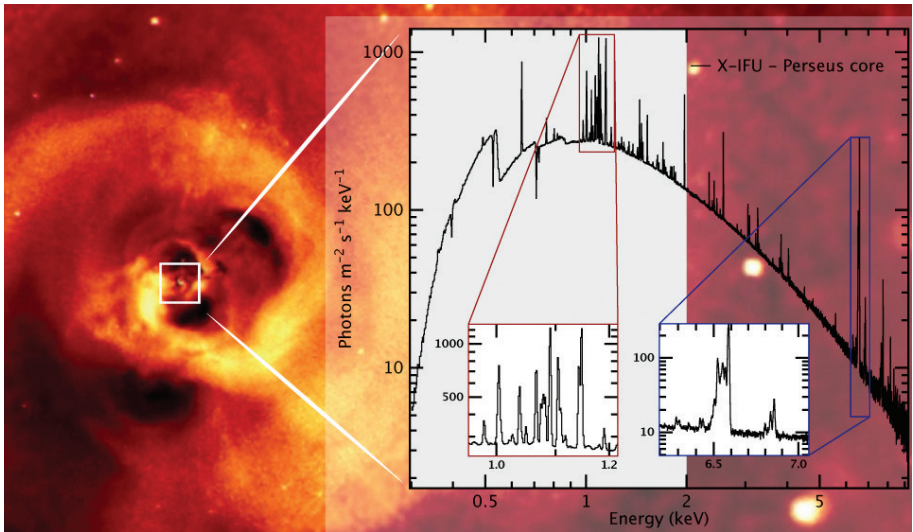
Horký a energetický vesmír je svět černých děr a hvězdných explozí. Zahrnuje i velmi horký plyn vyplňující prostor v kupách galaxií a je ústředním tématem výzkumu velké plánované observatoře ESA ATHENA (Advanced Telescope for High ENergy Astronomy). Tato vědecká observatoř bude přijímat rentgenové záření pocházející z rozličných objektů v blízkém i vzdáleném vesmíru a bude zkoumat celou řadu fyzikálních procesů. Rentgenové záření je velmi energetické, a proto vzniká tam, kde je vysoká teplota, nebo tam, kde se velké množství energie přeměňuje v intenzivní záření. Bude sloužit mnoha oborům astronomie a astrofyziky a skvěle doplňovat i další vesmírné observatoře, jako je Webbův teleskop přijímající infračervené záření, a další velké astronomické projekty na pozemních observatořích, mezi které patří velký budovaný dalekohled v ESO Extremely Large Telescope nebo Square Kilometer Array v rádiové oblasti.

Vědecké cíle mise

Od rentgenové mise ATHENA se zejména očekává, že nám pomůže pochopit, jak se zformovaly galaxie do velkých struktur, i to, jak se v jejich centrech zrodily černé díry, které narostly do obřích rozměrů. Tyto superhmotné černé díry váží od několika milionů až po desítky miliard hmot Sluncí, a mají tak rozměry srovnatelné s naší Sluneční soustavou. Největší známé struktury ve vesmíru jsou ale nadkupy galaxií, které mohou dosahovat takových rozměrů, že i světlu trvá několik miliard let dostat se z jedné části do druhé. Jak se tyto struktury utvořily?



Obr. 7.1 Mise ATHENA by měla odhalit, jak se zformovaly galaxie, i to, jak se v jejich centrech vytvořily obří černé díry (zdroj: IRAP, CNES, ESA & ACO)

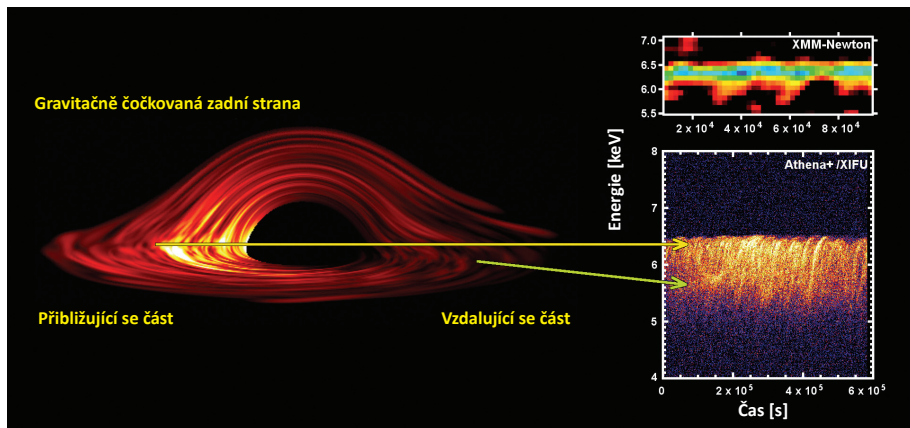


Obr. 7.2 Jádru kupy galaxií v Perseovi. S novým přístrojem X-IFU na misi ATHENA bude možné rozlišit jednotlivé spektrální čáry odpovídající různým prvkům i různým fyzikálním vlastnostem (teplota, ionizace) (zdroj: konsorcium ATHENA/X-IFU)

Struktury galaxií

Galaxie včetně naší Mléčné dráhy nežijí osamoceně, ale patří do různě velkých skupin. Místní skupina galaxií zahrnuje asi na 50 členů. Mezi větší galaxie patří galaxie v Andromedě, nacházející se asi 2 miliony světelných let daleko od nás. Ve větší vzdálenosti, asi 50 milionů světelných let, se nachází Kupa galaxií v Panně, která obsahuje asi dva tisíce galaxií. Tato kupa galaxií tvoří jádro větší jednotky, která se nazývá Místní nadkupa galaxií měřící 110 milionů světelných let a ve které se nachází asi stovka kup a skupin galaxií. Galaxie tedy nejsou ve vesmíru rozloženy rovnoměrně, ale tvoří shluky, filamentsy a stěny.

Je pravděpodobné, že za touto strukturou stojí rozložení temné hmoty, kterou ale nedokážeme pozorovat. Prostor mezi kupami galaxií však není prázdný. Tvoří ho horký plyn, jenž chladne pomaleji, než by se očekávalo. ATHENA si klade za cíl odhalit mechanismy, které plyn zahřívají, zjistit chemické složení a objevit tzv. chybějící baryony, tedy hmotu, jež není vidět, ale jejíž existence se předpokládá. Z kosmologických pozorování vyplývá, že normální hmota tvoří jen 5 procent energie vesmíru. Co vidíme na obloze, je přitom jen malý zlomek této hmoty. Odhaduje se, že ve hvězdách a v galaxiích se nachází pouhých 7 procent této hmoty, zbytek se nachází v mezigalaktickém plynu a celých 40 procent tohoto plynu jsme dosud nedokázali pozorovat



Obr. 7.3 Simulace záření akrečního disku okolo černé díry. Obraz disku je deformován silným gravitačním polem tak, že zadní část disku je zvednutá nad černou díru. Hmoty v disku obíhá vysokými rychlostmi. Část disku, která se pohybuje směrem k pozorovateli, je výrazně zjasněná, naopak vzdalující se část je potměněná. Díky citlivosti přístroje X-IFU na misi ATHENA bude možné studovat i časové změny v jasnosti a spektru rentgenového záření (zdroj: konsorcium ATHENA/X-IFU)

žádným teleskopem. Tento plyn je zřejmě příliš horký a ionizovaný, a tak nejlepší možností, jak jej odhalit, je použít citlivou rentgenovou spektroskopii.

Černé díry

Kromě horkého bude ATHENA zkoumat i energetický vesmír. Často jde o horký a energetický ruku v ruce. Například, jak hmota padá do černých děr, často nepadá přímo, ale před samotným pádem krouží okolo nich. Obíhá přitom vysokými rychlostmi a postupně klesá. Mezi jednotlivými částicemi dochází k velkému tření, jak mají různé rychlosti, a tím se zahřívají až na miliony stupňů. Takovému procesu nabalování hmoty na černou díru se odborně říká akrece a obíhající hmota utváří kolem černých děr tzv. akreční disk. Akreci hmoty na černé díry pozorujeme u gigantických monster ukrytých v nehmotnějších galaxiích i u černých děr, které vznikly gravitačním zhroucením velmi hmotných hvězd ve dvojhvězdném systému a které strhávají hmotu ze svého souputníka.

Černé díry nemají žádný pevný povrch, ale obklopuje je jednosměrná hranice, jež se nazývá horizont událostí a odkud již není návratu. Cokoliv do nich spadne, ať už



Obr. 7.4 Simulace obrazu akrečního disku okolo černé díry (kredit: Michal Bursa, ASU AV ČR)

hmota, nebo světlo, nedokáže se v důsledku příliš silné gravitace dostat ven a musí pokračovat dál do nitra černých děr. Uvnitř se nacházejí singularity, tedy body o nekonečně velké hustotě. Než se ale hmota dostane přímo pod horizont událostí, dává nám o sobě vědět v podobě emise silného energetického záření. To vzniká účinnou přeměnou energie v záření v horkém plazmatu, které vysokými rychlostmi obíhá okolo černé díry. Studium takového záření nám přináší cenné informace o tom, co se děje v takto silných gravitačních polích. Panují tam podmínky, jež nelze napodobit v žádné laboratoři na Zemi, a proto nám černé díry nabízejí příležitost zkoumat fyzikální zákony v těch nejextrémnějších podmínkách.

Samotné černé díry jsou matematicky jednoduché objekty, které je možné charakterizovat dvěma základními vlastnostmi – hmotností a rotací neboli spinem. Rotace černých děr je důležitá, protože ovlivňuje, jakým způsobem se strhává prostoročas⁵ v jejich těsném okolí. Zároveň nám míra rotace vypovídá o vzniku černých děr v případě zhroucených hvězd a růstu superhmotných černých děr. Zatímco pozorovat přímo, jak se černé díry zformovaly, je téměř nemožné, změřením rotace černých děr u většího vzorku galaxií můžeme určit, jaká byla historie nabalování hmoty. Velmi

⁵ Prostoročas vyjadřuje spojitost mezi prostorem a časem, jak vyplývá z obecné teorie relativity. V silných gravitačních polích v blízkosti černých děr se zakřivuje prostor, ale také se mění plynutí času.

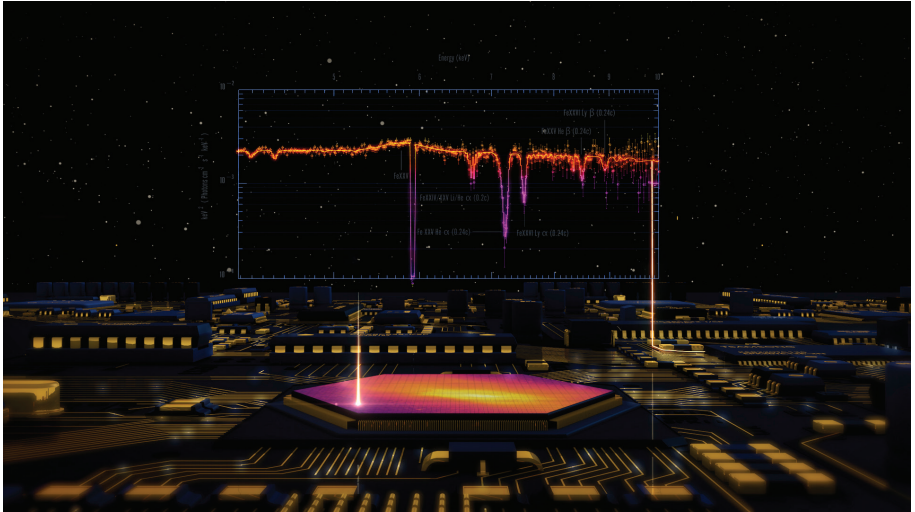
malý spin budou mít černé díry, jež narostly akrecí z různých chaotických směrů. Naopak vysoký spin budou mít černé díry krmené akrecí ve formě disku ze stále stejného směru. Střední hodnoty by pak poukazovaly na nárůst hmotnosti prostřednictvím srážek černých děr s různým momentem hybnosti. Citlivé detektory na misi ATHENA budou schopné změřit spin několika desítek černých děr v aktivních galaxiích a určit tak, jaký způsob růstu převažoval v kosmické historii.

ATHENA bude zkoumat jak blízké aktivní galaxie, tak s využitím dlouhé expozice dohlédne i do velkých vzdáleností. Bude pozorovat vysokoenergetické záření pocházející z raných galaxií, jejichž tajemství v současnosti odkrývá Webbův teleskop. Rentgenový hluboký snímek vesmíru přinese nové poznatky. Narostly černé díry do svých obřích rozměrů již krátce po zformování prvních galaxií, nebo snad ještě před nimi? To jsou otázky, na které bude mise ATHENA hledat odpovědi.

Návrh mise v historickém kontextu

S návrhem velké rentgenové mise přišla vědecká komunita již na konci minulého století krátce po vypuštění dvou významných a velmi úspěšných rentgenových observatoří, Chandra americké kosmické agentury NASA a XMM-Newton evropské ESA. Obě mise jsou stále v provozu a za více než dvě desetiletí pozorování umožnily plejádu nových objevů. Americká Chandra dokázala díky prvotřídní rentgenové optice pořídit úchvatné obrázky pozůstatků po supernovách (vybuchujících hvězdách) nebo aktivních galaktických jader. Evropská družice XMM-Newton má oproti Chandře velkou sběrnou plochu, a dokáže tedy nasbírat více rentgenových fotonů při relativně dobrém rozlišení jejich energie i času přeletu. Díky těmto vlastnostem pořizuje zejména kvalitní spektra, ve kterých rozeznáváme různé složky záření vzdálených objektů a také to, jak se v čase mění intenzita a vlastnosti studovaného rentgenového záření.

Již v té době bylo patrné, jaké možnosti by případně měla kosmická mise kombinující obě tyto vlastnosti dohromady, tedy skvělou rentgenovou optiku s citlivým detektorem rentgenových fotonů. Zrodil se koncept mezinárodní rentgenové observatoře, na které by se společně podílely Evropa, Spojené státy a Japonsko. Zejména vysoké finanční náklady takové mise ale nakonec vždy vedly k tomu, že žádný z původních konceptů nedospěl k samotné realizaci. Nové naděje svitly v roce 2013, kdy ESA vybrala jako své nosné téma pro příští misi téma horkého a energetického vesmíru. Zrodila se ATHENA. Původně měla startovat v roce 2028, ale studijní fáze se protáhla a těsně před tzv. adopcí mise, tedy přijetím mise kosmickou agenturou, dostala červenou kvůli vyšším finančním nárokům, než se původně předpokládalo. V současnosti probíhají detailní studie technologického konceptu této mise, které povedou ke snížení finančních nároků při zachování co nejvíce vědeckých cílů. Její vypuštění se aktuálně plánuje okolo roku 2037. Ukazuje to, jak náročná a dlouhá je

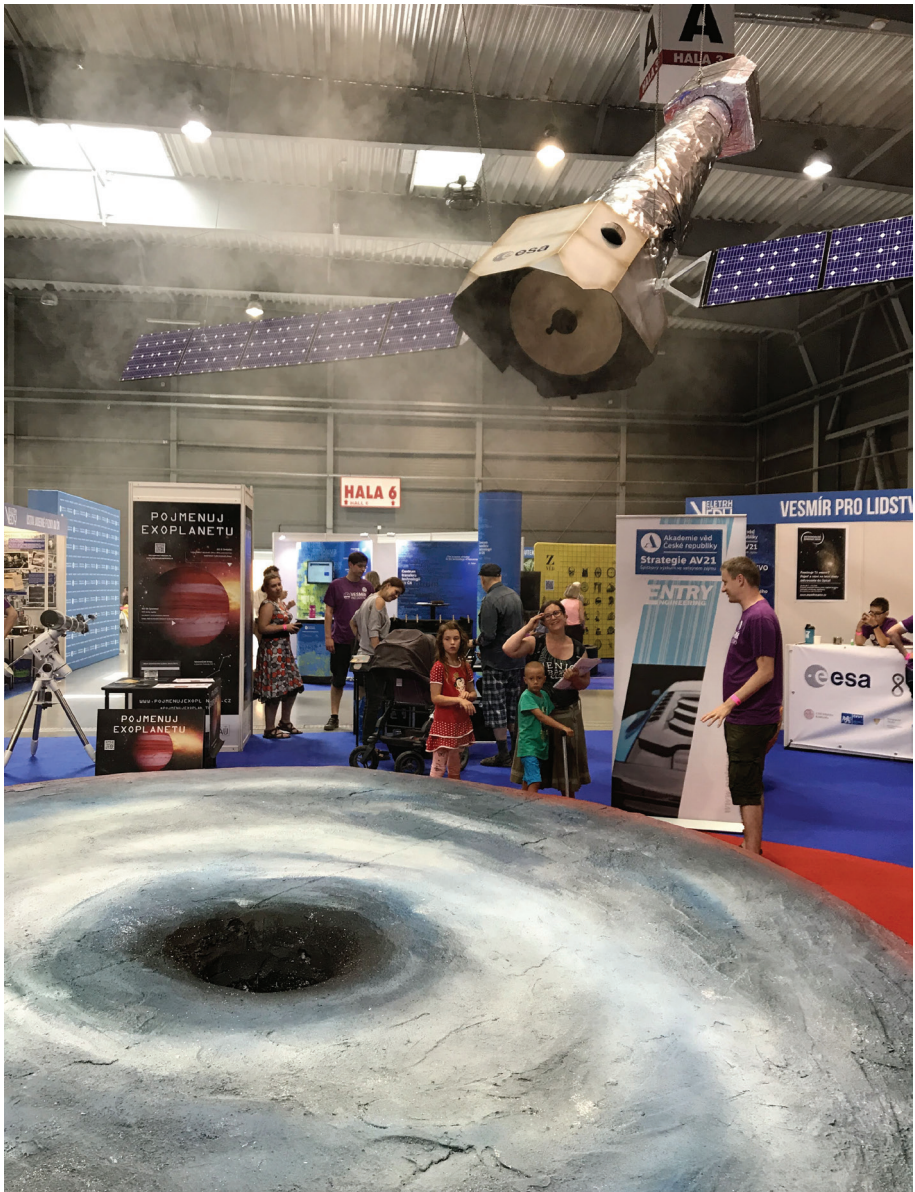


Obr. 7.5 Představa elektroniky přístroje X-IFU. Citlivý detektor chlazený na teplotu 50 mK zachytí jednotlivé rentgenové fotony. Při jejich absorpci v detektoru dojde ke zvýšení teploty a narušení supravodivého režimu. Následně z měřeného odporu bude možné přesně určit, jakou měl zachycený foton energii, a postupně tak sestavit rentgenové spektrum pozorovaného zdroje (zdroj: konsorcium X-IFU)

samotná příprava kosmické mise, než dojde k jejímu finálnímu vypuštění a následně vědecké sklizni nových pozorování.

Vědecké přístroje a český příspěvek k hardware

Hlavním plánovaným přístrojem mise ATHENA je přístroj X-IFU (X-ray Integral Field Unit), který je mimořádně citlivým rentgenovým mikrokalorimetrem. Jeho senzory budou magnetickými řetězci chlazené na teplotu 50 tisícín stupně nad absolutní nulou, tedy na teplotu $-273,1^{\circ}\text{C}$. Při tak nízké teplotě se budou detektory nacházet v supravodivém režimu a povedou díky tomu dokonale elektrický proud. Při dopadu rentgenového fotonu do detektoru dojde k uvolnění energie, a tím i náhlému zvýšení teploty. To se projeví ve skokovém nárůstu měřitelného odporu. Z něj se pak dá s vysokou přesností určit energie zachyceného fotonu i čas přiletu. Na základě těchto přesných měření bude potom možné sestavit detailní spektrum záření i studovat jeho proměnlivost.



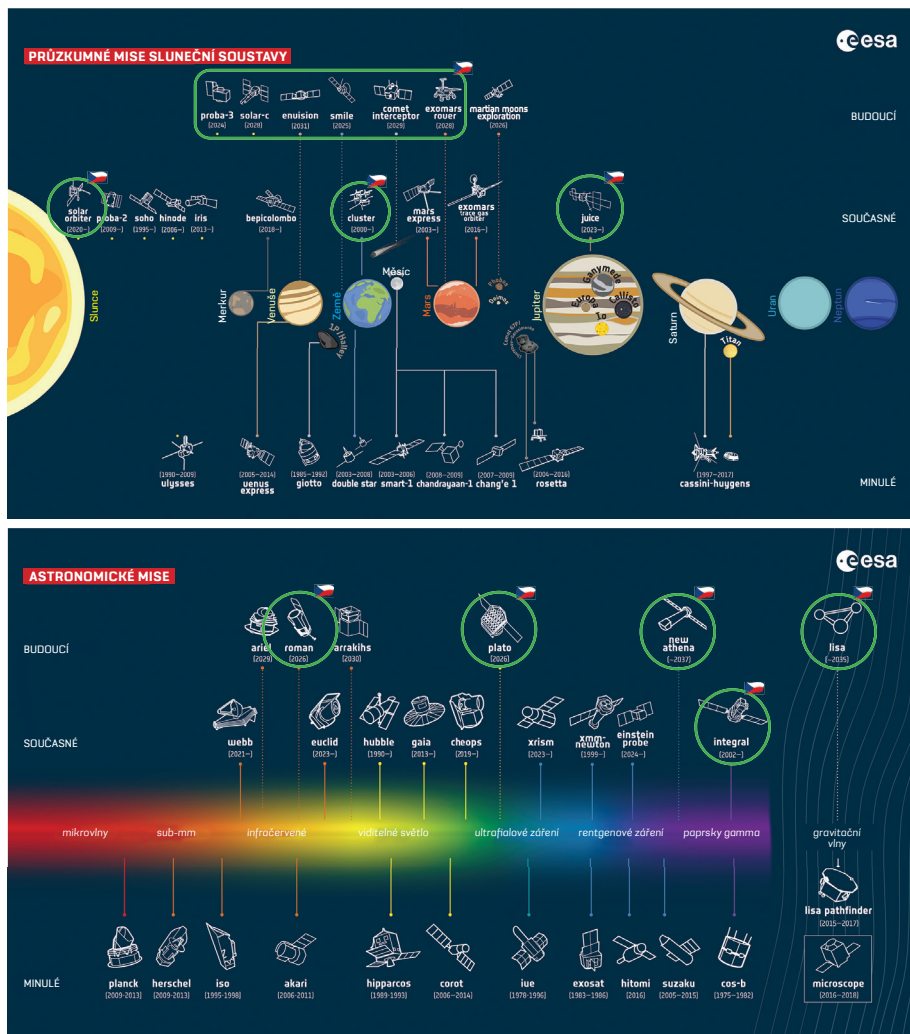
Obr. 7.6 Model mise ATHENA v měřítku 1 : 4 vznášející se nad modelem akrečního disku kolem černé díry. Vystaveno na veletrhu vědy v červnu 2019 (zdroj: ASU AV ČR)

Druhým vědeckým přístrojem bude WFI (Wide Field Imager). Jak název napovídá, jeho předností bude studium širšího zorného pole. To má výhodu, že v jeden okamžik může zkoumat mnohem více objektů. Tento přístroj tak bude klíčový pro objevování nových galaxií i pro zkoumání rozsáhlejších struktur, jakými jsou kupy galaxií nebo pozůstatky po výbuších supernov.

Český příspěvek k misi ATHENA spočívá jednak v plánování vědeckých cílů a simulacích budoucích dat, ale také v hardwarovém vývoji obou vědeckých přístrojů. Konkrétně ASU a ÚFA přispějí k citlivé elektronice na obou přístrojích. Na přístroji X-IFU se bude jednat o adresovací a synchronizační jednotku pro vyčítací elektroniku, která bude převádět zachycený signál detektorem na změřené napětí. Z něj bude možné odvodit energii každého zachyceného rentgenového fotonu. Pro přístroj WFI se pak vyvíjí sada galvanických izolačních modulů, jež budou sloužit jako zdroje přesného napětí pro jeho rentgenové kamerové senzory.

Závěr

Účast České republiky v kosmických programech v posledních desetiletích rostla nebývalým tempem. Významnou zásluhu na tomto růstu má členství ČR v ESA, díky kterému mají české výzkumné instituce a firmy nové unikátní možnosti, jak se



Obr. 8.1 Průzkumné a astronomické mise ESA s vyznačenou českou účastí (zdroj: ESA)

zapojit do mezinárodních konsorcií. Pro vědce tato účast znamená příležitost podílet se na nejvýznamnějších vědeckých projektech, a to jak při plánování vědeckých cílů a následné analýze dat, tak při samotném navrhování, testování a ladění nových technologií pro vědecké přístroje. Akademie věd ČR spatřuje v kosmických projektech významný potenciál, jak podpořit základní výzkum, ale zejména mezioborovou spoluprací napříč vědními oblastmi, s univerzitami, s průmyslovým sektorem i státní správou. K tomuto účelu vznikl na AV ČR program Strategie AV 21 Vesmír pro lidstvo, který se snaží iniciovat nové spolupráce a zároveň propagovat kosmické projekty vzhledem k ostatním odborníkům i široké veřejnosti. Česká republika se stala nedílnou součástí všech významných (středně velkých a velkých) misí ESA (**obr. 8.1**), jež budou definovat evropský kosmický program do roku 2040. Příští generace studentů a vědců tak budou mít otevřené cesty k nejmodernějšímu výzkumu s využitím nejšpičkovějších technologií.

Autoři

RNDr. Jiří Svoboda, Ph.D., (ASU) se ve svém výzkumu zabývá rentgenovou astronomií a studiem černých děr v centrech aktivních galaxií a v rentgenových dvojhvězdách. Zajišťuje odbornou spolupráci na mezinárodních kosmických misích určených k vědeckému výzkumu vesmíru. Je vedoucím české účasti na dvou plánovaných velkých misích ESA, rentgenové observatoře ATHENA a gravitační laboratoře LISA. Je koordinátorem výzkumného programu Strategie AV21 Vesmír pro lidstvo. Spolupracuje s univerzitami, kde přednáší o aktivních galaxiích, a je školitelem několika studentů. Věnuje se také popularizaci astronomie a kosmických projektů. Po absolvování doktorského studia na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy získal prestižní ESA Fellowship. Je držitelem ceny Bernarda Bolzana, Fričovy a Wichterleho prémie.

RNDr. František Fárník, CSc., byl členem technického konsorcia přístroje STIX pro sondu Solar Orbiter. Byl hlavním manažerem českého příspěvku, který spočívá ve vývoji, výrobě a dodání napájecích zdrojů pro tento přístroj.

prof. RNDr. Petr Heinzel, DrSc., (ASU) je vedoucím vědeckým pracovníkem zabývajícím se fyzikou Slunce a hvězd. Za Českou republiku je hlavním spoluřešitelem projektu Metis na sondě ESA Solar Orbiter a součástí týmu mise ESA Proba-3 s koronografem ASPIICS. Dlouhodobě se angažuje v zapojení AV ČR do kosmického výzkumu. Byl zakladatelem a prvním koordinátorem programu Strategie AV 21 Vesmír pro lidstvo 2017–2019.

RNDr. Stanislav Gunár, Ph.D., (ASU) je astrofyzikem se zaměřením na studium Slunce a jeho aktivity. Jedním z jeho primárních cílů je lepší pochopení slunečních protuberancí s využitím multispektrálních pozorování i modelování přenosu záření v jejich plazmatu. Je jedním z vedoucích spoluřešitelů vesmírného koronografu ASPIICS na palubě mise Proba-3.

Ing. Jan Souček, Ph.D., (ÚFA) se specializuje na fyziku vlnových procesů v kosmickém plazmatu a na měření elektromagnetického pole a vlastností kosmického plazmatu na umělých družicích a sondách. Vede inženýrský tým, který vyvíjí vědecké přístroje pro kosmické mise včetně velkých pro ESA, jako jsou Solar Orbiter, Comet Interceptor, Vigil, ATHENA nebo LISA.

prof. RNDr. Ondřej Santolík, Dr., (ÚFA) studoval na MFF UK a na Université d'Orléans ve Francii; zkušenosti s analýzou měření umělých družic a meziplanetárních sond získával též během svých pobytů na University of Iowa v USA. Nyní vede oddělení kosmické fyziky na ÚFA, kde se zabývá fyzikou kosmického plazmatu se zaměřením

na experimentální výzkum vln a nestabilit; je vedoucím českého týmu, který připravuje přístroj pro měření rádiových a plazmových vln na meziplanetární sondě JUICE.

Ing. Ivana Kolmašová, Ph.D., (ÚFA) se zabývá fyzikou plazmatu, analýzou družicových dat a dat z pozemních měření. Věnuje se především problematice elektromagnetických vln generovaných přírodními bleskovými výboji jak na Zemi, tak na dalších planetách Sluneční soustavy. Od roku 2016 předsedá Českému národnímu komitétu Unie rádiové vědy URSI. V rámci mise Comet Interceptor má na starosti český příspěvek ve formě elektronických desek řídicí jednotky a analyzátoru prachu DAPU pro přístroj DFP na měření prachu, polí a plazmatu DFP na mateřské sondě a jedné z dceřiných sond.

Mgr. Petr Brož, Ph.D., (GFÚ) se věnuje výzkumu a popularizaci sopečné činnosti například Sluneční soustavou, specializuje se na Mars.

RNDr. Martin Ferus, Ph.D., (ÚFCH JH) je fyzikálním chemikem se specializací v oboru aplikované spektroskopie a astrochemie. Vede české zastoupení v misích Ariel, EnVision a vývoj spektrálních systémů pro pozorování a analýzu meteorů pomocí CubeSatů.

Dipl.-Phys. Petr Kabáth, Dr. rer. nat., (ASU) vede skupinu výzkumu exoplanet na stálém oddělení. Před příchodem na ASU pracoval na Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum v Berlíně a na Evropské jižní observatoři (ESO) v Chile, kde se věnoval výzkumu exoplanet a jejich atmosfér.

prof. RNDr. Svatopluk Civiš, DSc., (ÚFCH-JH) vykonával funkci vedoucího oddělení chemické fyziky, později oddělení spektroskopie. Specializuje se na vysoce citlivé analytické techniky, dálkovou detekci molekul ve vesmíru, simulaci procesů v mezihvězdném prostoru a chemii laserového plazmatu.

Mgr. Ondřej Zelenka, Ph.D., (ASU) je mladým vědeckým pracovníkem, který se zabývá gravitačními vlnami, především astrofyzikálními zdroji pro misi LISA a aplikacemi strojového učení ve fyzice.

Poděkování

Vznik a vydání brožury podpořila Akademie věd ČR ve výzkumném programu Strategie AV21 Vesmír pro lidstvo.

Nová strategie Akademie věd České republiky

motto: „Špičkový výzkum ve veřejném zájmu“

Program Vesmír pro lidstvo

Program posiluje zapojení Akademie věd ČR do kosmického výzkumu. Využívá přitom synergie mezi pracovišti AV ČR, spolupráci s průmyslem a univerzitami. Výzkumné zaměření odráží vědecké cíle hlavních vesmírných misí Evropské kosmické agentury (ESA) a dalekohledů Evropské jižní observatoře (ESO), zahrnující výzkum Slunce a Sluneční soustavy, Země a jejího okolí, hvězd a exoplanet, galaxií, astronomii gravitačních vln, rentgenovou a rádiovou astronomii i vývoj nových kosmických technologií a vědeckých přístrojů. Snažíme se o maximální využití našeho členství v mezinárodních vědeckých organizacích a pomáháme realizovat plnohodnotnou účast ČR na prvotřídních projektech týkajících se výzkumu vesmíru, stejně jako posílit rychle se rozvíjející národní kosmický program. Vývoj hardwarového vybavení pro kosmické vědecké přístroje má významný aplikační potenciál v průmyslu inovativních technologií a umožňuje rozvoj špičkových technologií v ČR. Součástí programu jsou také celospolečenská témata zabývající se trvale udržitelným rozvojem lidstva. Výzkumný program propojuje odborníky napříč vědními oblastmi v jedné společné platformě, která umožňuje rozvíjet a vytvářet nové spolupráce. V odborném týmu se nachází ústavy s největší tradicí kosmického výzkumu v ČR stejně jako ústavy, které využijí svých znalostí a technologií k novým zapojením do kosmických projektů.

Koordinátor

RNDr. Jiří Svoboda, Ph.D.

Koordinační pracoviště

Astronomický ústav AV ČR, v. v. i.

Partnerská pracoviště

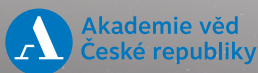
- Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i.
- Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.
- Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i.
- Geofyzikální ústav AV ČR, v. v. i.
- Psychologický ústav AV ČR, v. v. i.
- Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i.
- Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, v. v. i.
- Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.
- Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i.
- Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i.
- Mikrobiologický ústav AV ČR, v. v. i.

Spolupracující instituce

- Český hydrometeorologický ústav
- Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy
- ESERO – vzdělávací kancelář ESA
- Planetum
- Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity
- Vysoké učení technické – Ústav radioelektroniky
- České vysoké učení technické – Hydronaut Project
- Crytur
- Frentech Aerospace
- L. K. Engineering
- Universal Scientific Technologies
- Elya
- Pražský Inovační Institut
- Ministerstvo dopravy ČR
- Výzkumný a zkušební letecký ústav, a. s.
- Česká vesmírná aliance
- Ministerstvo životního prostředí ČR

Výzkum vesmíru a kosmické mise mají v České republice bohatou tradici. Rozvoj těchto aktivit však v dnešní době není myslitelný bez široké mezinárodní spolupráce, která umožňuje řešit komplexní problémy, využívat špičkovou technologii a kombinovat lidské i finanční kapacity v jednotlivých zemích. Pro Českou republiku se dveře k významné mezinárodní spolupráci otevřely v roce 2008, kdy se stala součástí Evropské kosmické agentury (European Space Agency, ESA). Posláním ESA je realizace evropského vesmírného programu, který si klade za cíl zjistit více informací o Zemi, jejím bezprostředním okolí, o naší Sluneční soustavě a vesmíru, jakož i rozvíjet družicové technologie a služby a podporovat také evropský průmysl.

O jednotlivých kosmických misích ESA a českém příspěvku k nim podrobněji pojednává tato publikace. První misí ESA, v níž má ČR významné zapojení, je sonda Solar Orbiter určená k výzkumu Slunce. Další misí s českým příspěvkem je velká mise ESA k ledovým měsícům Jupitera, která se vydala na svou pouť v roce 2023. Další kapitoly brožury se týkají budoucnosti – ta bude ve znamení zkoumání planet mimo Sluneční soustavu a misí PLATO a Ariel, mise plánované k Venuši a v neposlední řadě to bude znamenat dvě velké plánované mise, které si kladou za cíl odhalit, jak vznikly superhmotné černé díry v centrech galaxií. Ve všech těchto projektech je ČR významně zastoupena při vědecké přípravě i v budování důležitých součástí vědeckých přístrojů, a to i díky společnému programu Strategie AV 21 Vesmír pro lidstvo.



STRATEGIE AV21

Edice Strategie AV21 | Vesmír pro lidstvo

Jiří Svoboda a kol. | **Evropské kosmické mise s českou účastí**

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., pro Kancelář Akademie věd ČR, Národní 3, 117 20 Praha 1. Grafická úprava Robin Brichta. Fotografie na obálce © Jody Amiet, AFP a ESA.

Odpovědná redaktorka Dana Packová. Technická redaktorka Jolana Petrlíková. Obrazová redaktorka Lucie Veselá.

Vydání 1., 2024. Ediční číslo 13130. Sazba a tisk **SERIFA**®, s. r. o., Jínonická 80, 158 00 Praha 5.

ISBN 978-80-200-3620-9

<http://av21.avcr.cz>

ISBN 978-80-200-3620-9



9 788020 036209